

Marcel Georgi

***„Untersuchung dünnwandiger Stahlquerschnitte unter dem
Aspekt der Tragfähigkeit“***

eingereicht als:

BACHELORARBEIT

an der:

HOCHSCHULE MITTWEIDA

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Fakultät Stahl- und Metallbau

Roßwein, den 31.08.2011

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. T. Laufs

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. H. Hobler

Bibliographische Beschreibung:

Georgi, Marcel:

Untersuchung von dünnwandigen Stahlquerschnitten unter dem Aspekt der Tragfähigkeit – 2011 – 198 Seiten, Roßwein, Hochschule Mittweida, Fachbereich Stahl- und Metallbau, Bachelorarbeit, 2011-08-31

Referat:

Ziel der Bachelorarbeit ist es, dünnwandige kaltgeformte C-Profile auf deren Tragfähigkeit hin zu untersuchen. Da es in der heutigen Zeit von immer größerer Bedeutung ist sparsam mit Ressourcen umzugehen, hat man im konstruktiven Ingenieurbau das Bestreben, immer dünnwandigere und schlankere Tragwerke zu konzipieren. Mit der Einführung des Eurocode als Nachfolgenorm der DIN wurde nun die Grundlage geschaffen, Profile wirtschaftlicher und effizienter bemessen zu können.

	Seite
Inhalt	I
Abbildungsverzeichnis	IV
1. Einleitung	1
1.1 Zielsetzung und Motivation der Bachelorarbeit	1
1.2 Aufbau der Bachelorarbeit	3
1.3 Die Entstehung der Eurocodes	4
1.4 Allgemeiner Überblick über das Eurocodeprogramm	5
1.5 Stand der Technik	7
1.5.1 Lokales Stabilitätsversagen – Beulen	8
1.5.2 Globales Stabilitätsversagen – Knicken	10
1.5.3 Interaktion von lokalen und globalen Stabilitätsversagen	11
1.6 Abgrenzung der Arbeit	12
2. Theoretische Grundlagen	16
2.1 Anwendungsbereich des [EN 1993-1-3]	16
2.2 Klassifizierung von Querschnitten nach [EN 1993-1-3]	17
2.3 Grundlagen der Tragwerksbemessung nach [EN 1993-1-3]	21
2.3.1 Geregelte Werkstoffe	21
2.3.2 Querschnittsformen/ Bauteilformen	23
2.3.3 Maximale Breiten-Dicken-Verhältnisse	25
2.3.4 Einfluss ausgerundeter Ecken	26
2.3.5 Maßgebende Versagensformen druckbeanspruchter C- Profile	27
2.3.6 Modellierung von Querschnittsteilen	28
2.3.7 Ermittlung der Federsteifigkeiten	29
2.3.8 Allgemeines Vorgehen bei dünnwandigen Querschnitten mit Randversteifungen	31

	Seite
3. Bemessungsablauf nach [EN 1993-1-3]	33
4. Untersuchung ausgewählter dünnwandiger Querschnitte	36
	36
4.1 Untersuchungsgegenstand	38
4.2 Querschnittsuntersuchung	38
4.2.1 Querschnitt C 80x90x2	39
4.2.1.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung	41
4.2.1.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben	43
4.2.1.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung	52
4.2.1.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse	60
4.2.1.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit	61
4.2.1.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität	68
4.2.2 Querschnitt C 90x90x2	69
4.2.2.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung	71
4.2.2.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben	73
4.2.2.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung	82
4.2.2.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse	90
4.2.2.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit	91
4.2.2.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität	98
4.2.3 Querschnitt C 100x90x2	99
4.2.3.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung	101
4.2.3.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben	103
4.2.3.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung	112
4.2.3.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse	120
4.2.3.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit	121
4.2.3.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität	

	Seite
4.2.4 Querschnitt C 110x90x2	
4.2.4.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung	128
4.2.4.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben	129
4.2.4.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung	131
4.2.4.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse	133
4.2.4.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit	142
4.2.4.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität	151
4.2.5 Querschnitt C 120x90x2	
4.2.5.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung	158
4.2.5.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben	159
4.2.5.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung	161
4.2.5.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse	163
4.2.5.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit	172
4.2.5.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität	181
 5. Auflistung und Auswertung der Ergebnisse	 188
5.1 Querschnittswerte	
5.2 Grenztragfähigkeiten	188
5.3 Auswertung	189
	190
 6. Zusammenfassung	 193
 Literaturverzeichnis	 196
Eidesstaatliche Erklärung	198

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb.1.1: Reduzierte zulässige Spannung über den gesamten Querschnitt	8
Abb.1.2: Spannungsausnutzung bis zu f_y des reduzierten Querschnitts	10
Abb.1.3: Profil 1 – C80/90/2	13
Abb.1.4: Profil 1 – C90/90/2	13
Abb.1.5: Profil 1 – C100/90/2	14
Abb.1.6: Profil 1 – C110/90/2	14
Abb.1.7: Profil 1 – C120/90/2	14
Abb.2.1: Quelle: [EN 1993-1-1, Abs.5.5.2], Ausgabe 2010	17
Abb.2.2: Quelle: [EN 1993-1-1, Tab.5.2], Ausgabe 2010	18
Abb.2.3: QK für beidseitig (!) gestützte, druckbeanspruchte Querschnittsteile	19
Abb.2.4: QK für einseitig (!) gestützte, druckbeanspruchte Bleche	20
Abb.2.5: QK von druckbeanspruchten Winkelprofilen	20
Abb.2.6: QK von druckbeanspruchten, runden Hohlprofilen	21
Abb.2.7: Nennwerte der Basisstreckgrenze f_{yb} und der Zugfestigkeit f_u	21
Abb.2.8: Beispiele für weitere geregelte Stahlsorten	22
Abb.2.9: Einzelne offene Querschnitte	23
Abb.2.10: Offene, zusammengesetzte Querschnitte	23
Abb.2.11: Geschlossene, zusammengesetzte Querschnitte	23
Abb.2.12: Druck- und Zugglieder	24
Abb.2.13: Träger und Bauteile für Biegebeanspruchung	24
Abb.2.14: Profilbleche als Falwerke und Kassettenprofile	24
Abb.2.15: Bereichsgrenzen zur Anwendung des [EN 1993-1-3]	25
Abb.2.16: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.1, Seite 21	26
Abb.2.17: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.5a, Seite 28	27
Abb.2.18: Modellierung von Querschnittsteilen	28
Abb.2.19: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.6, Seite 30	29
Abb.2.20: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.6, Seite 30	29
Abb.2.21: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.6, Seite 30	30
Abb.2.22: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.7, Seite 32	31
Abb.2.23: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.8, Seite 34	32

1. Einleitung

1.1 Zielsetzung und Motivation der Arbeit

Moderner innovativer Ingenieurbau, vor allem der Bereich Stahlbau, zeichnet sich durch materialoptimierte Tragwerke aus, d.h. es kommen mehr und mehr dünnwandige, schlanke Profile zum Einsatz.

Zur Bemessung von dünnwandigen Stahlquerschnitten diente in Deutschland bislang ergänzend zur DIN 18800 – *Stahlbauten* – die DAST-Richtlinie 016 – *Bemessung und konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen* – und speziell für Stahltrapezprofile die DIN 18007.

Im Bereich Stahlbau setzte sich zur Bemessung dünnwandiger Querschnitte vor allem die DIN 18800 Teil 3 durch und wurde in den vergangenen Jahren somit zum „Standardverfahren“ in Deutschland.

Profile unterliegen in erster Linie zweierlei Stabilitätsgefahren. Auf lokaler Ebene neigen die ebenen Querschnittsbleche unter Druckbeanspruchung zum Ausbeulen. Auf globaler Ebene muss für schlanke Stäbe das Ausknicken beachtet werden.

Bisher war es nach deutscher Norm [DIN 18800-3] üblich, beide Stabilitätsprobleme getrennt zu betrachten und sowohl für die Querschnittstragfähigkeit als auch für die Stabtragfähigkeit einen Reduktionsbeiwert zu ermitteln. Deren gegenseitige Beeinflussung spielte dabei keine Rolle. Das Zusammenwirken der Reduktionsbeiwerte wurde vereinfacht durch Multiplikation beider Werte berücksichtigt. Dieses Vorgehen entspricht aber nicht dem tatsächlichen Tragverhalten und führt in vielen Fällen zu äußerst unwirtschaftlichen Konstruktionen.

Mit der Fertigstellung und Einführung des Eurocode 3 – *Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten* – und dem darin enthaltenen Teil 1-3 – *Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche* – wurde nun eine neue europäische Norm zur Berechnung dünnwandiger Bauteile und Bleche auf den Weg gebracht, die erstmals die Interaktion beider Stabilitätsprobleme berücksichtigt. Zunächst wird die Querschnittstragfähigkeit beulgefährdeter Querschnitte über das Verfahren der wirksamen Breiten reduziert. Im Anschluss daran wird die Stabschlankheit mit einem vom wirksamen Querschnitt abhängigen Beiwert modifiziert, so dass der Reduktionsbeiwert für das Stabknicken, der mit den bekannten europäischen Knickspannungslinien ermittelt wird, indirekt einen Reduktionsbeiwert für das Gesamtstabilitätsproblem darstellt.

Im Rahmen meiner Bachelorarbeit beschäftige ich mich nun eingehend mit der Untersuchung dünnwandiger Stahlquerschnitte, im speziellen mit C-Profilen, unter dem Aspekt der Tragfähigkeit nach DIN EN 1993-1-3.

Ziel meiner Untersuchungen wird sein, herauszufinden, wie sich eine schrittweise Änderung der Steghöhe (80/90/100/110/120) auf die Querschnittstragfähigkeit sowie auf die Gesamttragfähigkeit der Profile auswirkt.

Als zu untersuchende Querschnitte wähle ich kaltgeformte dünnwandige C-Profile mit Randversteifung, deren Aufbau in Kapitel 1.6 detailliert beschrieben ist.

1.2 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit umfasst hauptsächlich 3 Teile.

Im ersten Teil der Arbeit wird ein kurzer Überblick über die Geschichte der Entstehung der Eurocodes, sowie über den aktuellen Stand der Technik gegeben. Dabei werden die Nachweiskonzepte der im Moment gültigen DIN 18800-3 mit denen des zukünftig zur Anwendung kommenden EN 1993-1-3 verglichen, um zu zeigen, welche große Bedeutung die Einführung des EN 1993-1-3 gerade im konstruktiven Ingenieurbau hat, da dünnwandige Querschnitte exakter modelliert, bemessen und somit wirtschaftlicher ausgelegt werden können.

Im ersten Teil wird außerdem ein Überblick über das Eurocode 3- Programm geschaffen. Dieser beinhaltet die theoretischen Grundlagen, speziell aus Teil 1-3 der Norm. Dabei wird auf den Anwendungsbereich der DIN EN 1993-1-3, die anwendbaren Stahlgüten, deren mögliche Querschnittsformen, sowie die Einteilung dieser Querschnitte in bestimmte Querschnittsklassen, mögliche Versagensformen und Nachweise gegen diese eingegangen.

Abschließend zu den Grundlagen wird ein schematischer Berechnungsalgorithmus zum allgemeinen Ablauf des Nachweises von dünnwandigen Stahlprofilen nach DIN EN 1993-1-3 erstellt.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit der Berechnung dünnwandiger kaltgeformter C-Profile. Darin werden 5 genau definierte Querschnitte (siehe Kapitel 1.6) nach DIN EN 1993-1-3 nachgewiesen und der Berechnungsablauf, mit den jeweiligen Verweisen auf die Norm, aufgezeigt!

Im dritten Teil der Arbeit werden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt und ausgewertet. Es wird untersucht, wie sich durch Variation der Steghöhe die Tragfähigkeit von C- Profilen verändert.

Aufgrund der stofflichen Vielfalt ist eine Eingrenzung der Untersuchungen, beispielsweise hinsichtlich der verwendeten Materialien, Querschnitte oder auch des statischen Systems, erforderlich (siehe Kapitel 1.6).

1.3 Die Entstehung der Eurocodes

Durch den Zusammenschluss einzelner europäischer Staaten zur Europäischen Union wurde es für die Mitglieder notwendig, eine einheitliche Normung innerhalb der EU zu schaffen. Die Eurocodes sind als europäische Standards in Bezug auf die Konstruktion von Gebäuden und andere Ingenieurbauten festgelegt. Sie sind vom Fachausschuss 250 (TC250) und vom europäischen Komitee für Normung – CEN – von 1975 bis 2004/2005 entworfen worden.

Die Eurocodes sind seit dem 1. Quartal 2011 in Deutschland schrittweise anwendbar und voraussichtlich ab dem 01. Juli 2012 verbindlich.

(Quelle: www.eurocodes-online.com, Stand: 11.08.2011)

In erster Linie wurden die Eurocodes für Statiker erstellt. Dabei wurden für die Gestaltung von Gebäuden beispielsweise Erdbebenberechnung oder Tragwerksbemessung für den Brandfall mit einbezogen. Aber nicht nur die Statiker arbeiten mit den Eurocodes. Sie spielen für viele Partner aus der Baubranche und Industrie eine bedeutende Rolle.

Mit den Eurocodes ist nun ein einheitliches Sicherheitsniveau in der Baubranche europaweit garantiert, auch wenn durch die jeweiligen nationalen Anhänge länderspezifische Abweichungen nicht auszuschließen sind. Sie bilden außerdem eine gemeinsame und transparente Grundlage für einen fairen Wettbewerb innerhalb der Europäischen Union. Darüber hinaus erleichtern sie den Austausch von Bauleistungen und erweitern den Einsatz von Materialien und Bauteilen, da Handelshindernisse abgebaut wurden. Man verspricht sich für die europäische Bauindustrie durch die Einführung der Eurocodes und der darin enthaltenen optimierten Berechnungsverfahren, unter Beibehaltung der Vielfalt und Bandbreite, dem Bausektor eine höhere Werterstellung zu verschaffen.

Die Eurocodes werden durch die nationalen Normeninstitute, gemeinsam mit einem Nationalen Anhang für jeden Eurocodeteil, für die Anwendung in dem jeweiligen Land veröffentlicht. Der nationale Anhang erlaubt jedem Mitgliedsstaat seine eigenen lokalen Unterschiede in Bezug auf Geographie, Klima und individuelle Gegebenheiten einzustellen. Das Sicherheitsniveau soll dabei jederzeit bestehen bleiben.

1.4 Allgemeiner Überblick über das Eurocodeprogramm

Nachfolgend werde ich den Aufbau der Eurocodes einschließlich deren Untergliederung im Bereich Stahlbau darstellen, um eine bessere Übersicht und somit ein besseres Verständnis zu verschaffen.

Aufbau der Eurocodes:

Die Eurocodes für den konstruktiven Ingenieurbau sind eine Reihe von 10 europäischen Normen von denen jede aus einzelnen Teilen besteht:

EN 1990 Eurocode 0	Grundlagen der Tragwerksplanung
EN 1991 Eurocode 1	Einwirkungen auf Tragwerke
EN 1992 Eurocode 2	Bemessung und Konstruktion von Stahlbetonbauten
EN 1993 Eurocode 3	Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
EN 1994 Eurocode 4	Bemessung und Konstruktion von Stahl-Beton-Verbundbauten
EN 1995 Eurocode 5	Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
EN 1996 Eurocode 6	Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten
EN 1997 Eurocode 7	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Anlagen im Bereich Geotechnik
EN 1998 Eurocode 8	Auslegung von Bauwerken in Erdbebengebieten
EN 1999 Eurocode 9	Bemessung und Konstruktion von Aluminiumkonstruktionen

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – EN 1993

EN 1993-1	Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
EN 1993-2	Stahlbrücken
EN 1993-3	Türme, Maste und Schornsteine
EN 1993-4	Tank- und Silobauwerke und Rohrleitungen
EN 1993-5	Spundwände und Pfähle aus Stahl
EN 1993-6	Kranbahnträger

Allgemeine Bemessungsregel und Regeln für den Hochbau – EN 1993-1

EN 1993-1-1	Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
EN 1993-1-2	Baulicher Brandschutz
EN 1993-1-3	Kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche
EN 1993-1-4	Nichtrostender Stahl
EN 1993-1-5	Plattenbeulen
EN 1993-1-6	Festigkeit und Stabilität von Schalentragwerken
EN 1993-1-7	Festigkeit und Stabilität ebener Blechfelder mit Querbelastrung
EN 1993-1-8	Bemessung und Konstruktion von Anschlüssen und Verbindungen
EN 1993-1-9	Ermüdung
EN 1993-1-10	Auswahl der Stahlsorten im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung
EN 1993-1-11	Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zügelementen aus Stahl
EN 1993-1-12	Zusätzliche Regeln zur Erweiterung von EN 1993 auf Stahlgüten bis S700

→ Maßgebend im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die EN 1993-1-3 sein.

1.5 Stand der Technik

Seit langer Zeit ist die Problematik bekannt, dass dünnwandige Bleche und/ oder Querschnittsteile gegenüber ihrer elastischen Tragfähigkeit reduziert werden müssen. Bereits Anfang des vorigen Jahrhunderts wurde von *Kármán* und etwas später von *Winter* die Theorie der wirksamen Breiten entwickelt, auf der die meisten heutigen Nachweisverfahren beulgefährdeter Bleche beruhen.

Die Forschung im Bereich des globalen (Stab-) Knickens durch den Mathematiker Euler geht sogar bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts zurück. Mit seinen Theorien zum ideal- elastischen Stabknicken legte er die Grundlage für die meisten der heute zur Anwendung kommenden Nachweiskonzepte.

Im Kapitel 1.5.1 werde ich zuerst den Stand der Technik in Bezug auf das lokale Stabilitätsproblem Plattenbeulen darstellen. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Methode der wirksamen Breiten.

Alternativ wird zum Vergleich die Methode der reduzierten Spannungen nach [DIN 18800-3] herangezogen.

Nach Betrachtung des lokalen Stabilitätsproblems widme ich mich in Kapitel 1.5.2 dem globalen Stabilitätsproblem (Biege-) Knicken.

Abschließend wird in Kapitel 1.5.3 die Interaktion von lokalen und globalen Stabilitätsproblem nach nationaler Norm [DIN 18800-3] und europäischer Norm [EN1993-1-3] verglichen.

1.5.1 Lokales Stabilitätsversagen – Beulen

In Bezug auf das lokale Stabilitätsproblem Plattenbeulen wurde zur Bemessung lange Zeit die **Methode der zulässigen Spannungen** nach [DIN 18800-3] als „Standardverfahren“ bevorzugt.

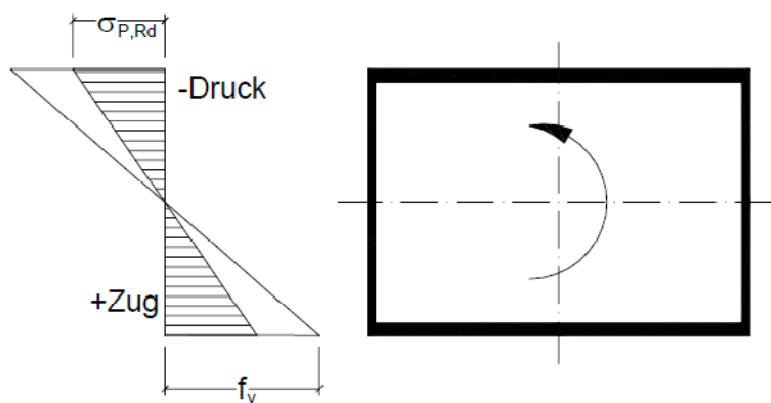
Zwar war es nach [DIN 18800-2] auch schon möglich den Nachweis dünnwandiger Profile nach der Methode der wirksamen Breiten zu führen, jedoch kam dies in der Praxis kaum zur Anwendung.

Bei der Methode der zulässigen Spannungen durfte die Beanspruchung des Einzelfeldes (Steg, Flansch, oder auch ein Teil eines dünnwandigen Profils) die zulässige Beulspannung nicht überschreiten. Die zulässige Beulspannung geht dabei auf die ideal- elastische Plattenbeulspannung zurück.

Da ein einzelnes beulegefährdetes Feld (zum Beispiel der Druckflansch eines Profils bei Momentenbelastung) zur Reduktion der zulässigen Spannung im Gesamtquerschnitt führt, auch auf dessen Zugseite was sehr unrealistisch ist, ist diese Bemessungsmethode als eher unwirtschaftlich anzusehen.

Abb.1.1 zeigt wie die zulässige Spannung aufgrund von Druck im Flansch eines Biegeträgers, nach der Methode der zulässigen Spannungen, über den gesamten Querschnitt abgemindert werden muss.

Abb.1.1: Reduzierte zulässige Spannung über den gesamten Querschnitt:



Mit Einführung der [EN 1993-1-3] wird nun die **Methode der wirksamen Breiten** als Hauptnachweisverfahren für alle Arten von dünnwandigen Profilen (egal ob kaltverformt oder geschweißt) zum Einsatz kommen. Eine gewisse Umorientierung bei der Bemessung wird somit erforderlich sein.

Als Grundlage der Methode der wirksamen Breiten wird angenommen, dass eine ebene dünnwandige Platte, die durch Druckspannung beansprucht wird, bei Überschreitung der ideal- elastischen Grenzlast in Form einer doppelt gekrümmten Fläche ausbeult. Durch diese Art der Verformung kann ein überkritisches Tragverhalten aktiviert werden, bei dem zusätzliche Druckspannungen von den steifen Randzonen aufgenommen werden. Die Methode der wirksamen Breiten nutzt somit diese Tragreserven, indem berücksichtigt wird, dass die mittlere aufnehmbare Spannung im Querschnitt über der kritischen Beulspannung liegt.

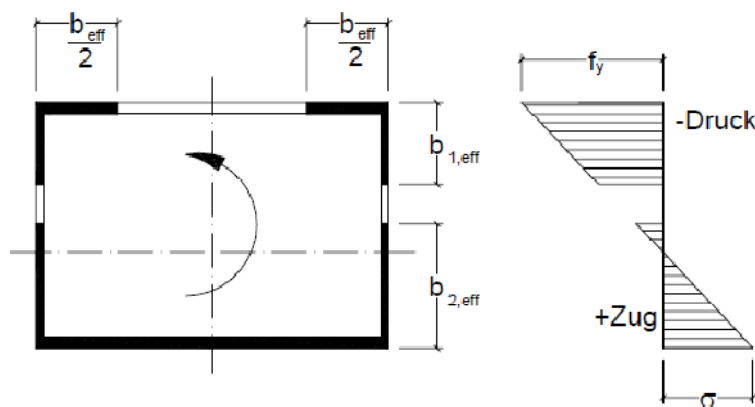
Alle Nachweise beulgefährdeter Querschnitte der Klasse 4, d.h. Querschnitte bei denen örtliches Beulen vor Erreichen der Streckgrenze in einem oder mehreren Teilen des Querschnitts auftritt (Einteilung der QK siehe Kapitel 2.2), müssen mit den auf wirksame Breiten reduzierten Querschnittswerten geführt werden.

Hierfür wird der Querschnitt in einzelne Teilfelder untergliedert und für jedes Teilfeld wird ein Reduktionsbeiwert ermittelt. Mit diesem Reduktionsbeiwert wird dann aus der tatsächlichen Plattenbreite eine fiktive Plattenbreite, auch wirksame Breite genannt, ermittelt. Aus diesen wirksamen Breiten der einzelnen Teilfelder und der damit verbundenen Schwerpunktverschiebung des Gesamtquerschnitts, kann nun die effektive Fläche und das effektive Widerstandsmoment des Querschnitts ermittelt werden.

Mit diesen effektiven Querschnittswerten werden dann sowohl Querschnittsnachweise (lokale Nachweise), sowie auch Stabnachweise (globale Nachweise) durchgeführt.

Schaut man sich die Spannungsverteilung eines nach der Methode der wirksamen Breiten bemessenen Querschnitts an (siehe Abb.1.5.2) und vergleicht diese mit Abb.1.2, so wird schnell klar, dass die Methode der wirksamen Breiten nach [EN 1993-1-3] eine wesentlich wirtschaftlichere Bemessung als die Methode der zulässigen Spannungen nach [DIN 18800-3] ermöglicht, da bei der Methode der wirksamen Breiten die wirksamen Querschnittsteile bis hin zu ihrer Streckgrenze ausgelastet werden, während nach der Methode der wirksamen Spannungen die zulässige Spannung im gesamten Querschnitt abgemindert wird.

Abb.1.2: Spannungsausnutzung bis zu f_y des reduzierten Querschnitts:



1.5.2 Globales Stabilitätsversagen – Knicken

Grundlage und somit Stand der Technik aller Stabilitätsnachweise für druckbeanspruchte schlanke Bauteile in nationalen und europäischen Stahlbaunormen sind die europäischen Knickspannungslinien.

Durch intensive Versuche, sowie zahlreicher numerischen Berechnungen, wurden 4 verschiedene Knickspannungslinien (a – d) festgelegt und später durch eine 5. Knickspannungslinie a_0 für hochfeste Stähle ergänzt. Alle typischen Profilformen können eindeutig einer dieser Linien zugewiesen werden. Der Einfluss von unvermeidlichen Imperfektionen und den damit verbundenen Lastexzentritäten, sowie Eigenspannungen können durch diese Knickspannungslinien bei der Bemessung berücksichtigt werden.

1.5.3 Interaktion von lokalen und globalen Stabilitätsversagen

Bei genauer Betrachtung der [DIN 18800-3] fällt auf, dass es sich beim Beulknicknachweis nicht um einen Interaktionsnachweis, sondern um eine einfache Multiplikation des Nachweises auf lokaler Ebene mit dem auf globaler Ebene handelt. Da beide Reduktionsfaktoren nur durch einfache Multiplikation miteinander verknüpft sind, ist es ein sehr konservativer und vor allem im Vergleich mit der Methode der wirksamen Breiten, unwirtschaftlicher Nachweis.

Beim Nachweis nach [EN 1993-1-3] wird hingegen bereits beim lokalen Beulnachweis eine effektive Querschnittsfläche ermittelt, mit der dann wiederum effektive Querschnittswerte berechnet werden. Mit diesen effektiven Querschnittswerten wird, unter Anwendung der europäischen Knickspannungslinien, der Knicknachweis auf globaler Ebene geführt werden kann.

Es wird sofort deutlich, dass bei der Nachweismethode der effektiven Breiten [EN 1993-1-3], anders als zur Nachweismethode der zulässigen Spannungen [DIN 18800-3], lokale und globale Nachweise in direkter Interaktion zueinander stehen.

Durch Einführung des [EN 1993-1-3] ist somit eine genauere und wirtschaftlichere Nachweisführung vor allem bei dünnwandigen beulgefährdeten Querschnitten möglich.

1.6 Abgrenzung der Arbeit

Aufgrund der stofflichen Vielfalt und Kompaktheit des Themengebietes ist es erforderlich den Umfang der Arbeit einzuschränken, in Bezug auf:

→ *Werkstoff*

Zur näheren Untersuchung herangezogen wird, der in der Baupraxis häufig angewendete höherfeste Baustahl, S355JO.

S 355 JO

- Werkst.-Nr. nach DIN EN 10027-2	1.0553
- Dichte ρ :	7,85Kg/dm ³
- Elastizitätsmodul E:	210.000N/mm ²
- Schubmodul G:	80.769N/mm ²
- Temperaturdehnzahl α_T :	12 x 10 ⁻⁶ 1/K
- Querkontraktionszahl ν :	0,3
- Streckgrenze f_y :	355N/mm ²
- Zugfestigkeit f_u :	510N/mm ²

→ Querschnitte

Im Rahmen meiner Arbeit untersuche ich die Tragfähigkeit dünnwandiger kaltgeformter C-Profile mit Randversteifung. Dabei wird die Steghöhe der C-Profile schrittweise um 10mm, von 80mm auf 120mm erhöht, während die Gurtbreite konstant 90mm beträgt. Die Materialstärke wurde mit $t = 2\text{mm}$ festgelegt. Der Biegeradius beträgt an der Innenkante $r = 2\text{mm}$. Die Lippenlänge ist ebenfalls 25,5mm festgelegt.

Folgende 5 Querschnitte werden untersucht:

Abb.1.3: Profil 1 – C80/90/2:

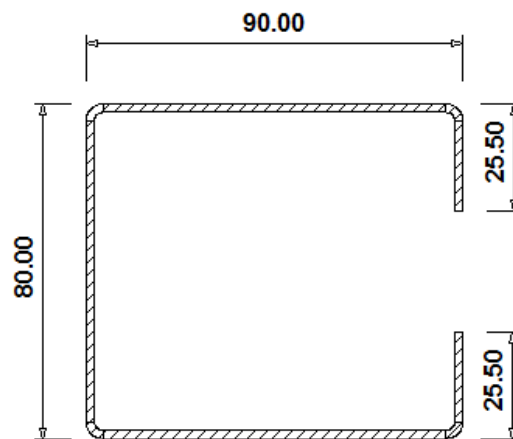


Abb.1.4: Profil 2 – C90/90/2:

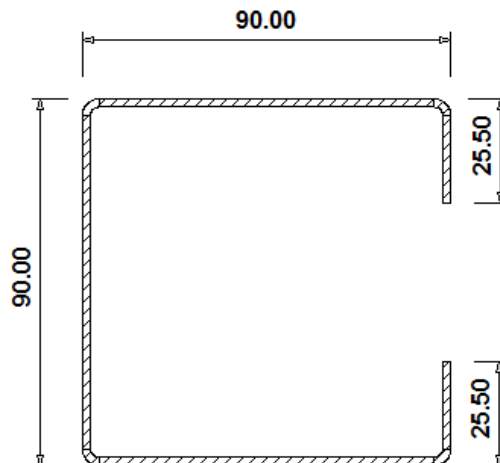


Abb.1.5: Profil 3 – C100/90/2:

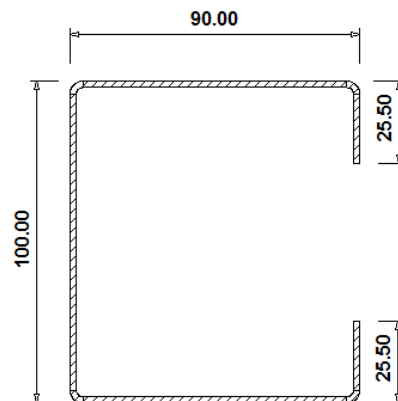


Abb.1.6: Profil 4 – C110/90/2:

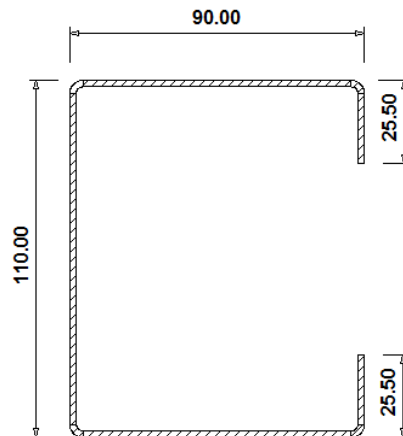
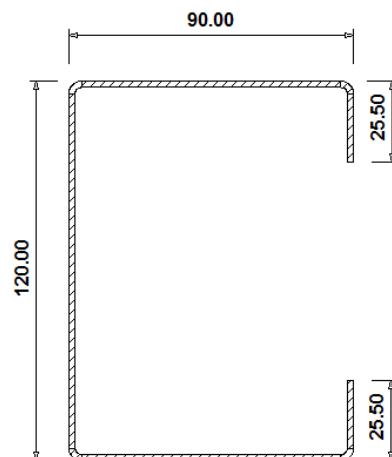


Abb.1.7: Profil 5 – C120/90/2:



→ **Statisches System**

Es wird folgendes statisches System untersucht:

beidseitig gelenkig gelagerte Stütze, am Fußpunkt Festlager, am Kopfpunkt vertikal verschiebliches Loslager → Knicklängenbeiwert $\beta = 1,0$



- Randbedingungen:
- $L = 1500\text{mm}$
 - Keine Verdrillung
 - Keine Verformung in der Zeichenebene
 - Keine Wölbeinspannung

→ **Nachweise/ Nachweisverfahren**

gemäß [EN 1993-1-3] sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit folgende Nachweise zu führen:

1. Querschnittstragfähigkeit;

nach [EN 1993-1-3; Abs. 6.1]

2. Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität;

nach [EN 1993-1-3; Abs. 6.2]

3. Beulnachweis von Querschnittsteilen;

durch die Ermittlung der effektiven Querschnittswerte A_{eff} , I_{eff} , W_{eff} , werden die Tragfähigkeitsnachweise nach den Regeln der Querschnittsklasse 4 geführt.

Auf den Nachweis gegen den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und/oder gegen die Sicherung der Dauerhaftigkeit wird im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht eingegangen, da ausschließlich die Untersuchung der maximalen Tragfähigkeit der C-Profile im Vordergrund steht.

2. Theoretische Grundlagen

2.1 Anwendungsbereiche des [EN 1993-1-3]

Vor jeder Tragfähigkeitsuntersuchung muss eine Einstufung des nachzuweisenden Querschnitts in eine bestimmte Querschnittsklasse erfolgen. Die Querschnittsklassen sind nach [EN 1993-1-1] folgendermaßen definiert:

- **Querschnittsklasse 1:** Der Querschnitt kann plastische Gelenke oder plastische Fließzonen mit ausreichender plastischer Momententragfähigkeit und Rotationskapazität für die plastische Berechnung ausbilden.
- **Querschnittsklasse 2:** Der Querschnitt kann die plastische Momententragfähigkeit entwickeln, hat aber aufgrund örtlichen Beulens nur begrenzte Rotationskapazität.
- **Querschnittsklasse 3:** Der Querschnitt erreicht für eine elastische Spannungsverteilung die Streckgrenze in der ungünstigsten Querschnittsfaser, kann wegen örtlichem Beulen aber nicht Plastizieren.
- **Querschnittsklasse 4:** Örtliches Beulen tritt vor Erreichen der Streckgrenze in einem oder mehreren Teilen des Querschnitts auf.

Die Berechnung nach [EN 1993-1-3] findet bei dünnwandigen kaltgeformten Querschnitten der Querschnittsklasse 4 Anwendung und tritt somit die Nachfolge der [DAST-Richtlinie 016] sowie in Teilen der [DIN 18800-3] an. Sie bezieht sich auf kaltgewalzte Stahlerzeugnisse aus beschichtetem oder nicht beschichtetem, warm- oder kaltgewalzten dünnwandigen Blech oder Band, das durch Rollprofilier- oder Kantverfahren kaltverformt wurde.

Die [EN 1993-1-3] enthält Nachweisverfahren mit Berechnungen und durch Versuche gestützte Berechnungen. Die Berechnungsverfahren beziehen sich lediglich auf die angegebenen Werkstoffe und geometrische Abmessungen, für die ausreichende Erfahrungswerte und Versuchsergebnisse vorliegen.

2.2 Klassifizierung von Querschnitten nach [EN 1993-1-1]

Querschnitte von Stahlprofilen werden entsprechend ihrem Tragverhalten in Querschnittsklassen (QK) 1 bis 4 eingeteilt.

Die c/t -Verhältnisse der einzelnen Querschnittsteile und die Spannungsverläufe sind maßgebend für die Zuordnung eines Querschnitts zu einer bestimmten QK. Die folgende Zuordnung eines Profils zu einer QK gilt sowohl für nicht stabilitätsgefährdete als auch für stabilitätsgefährdete Bauteile.

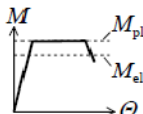
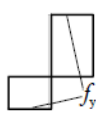
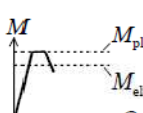
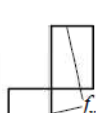
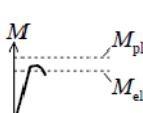
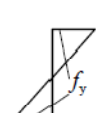
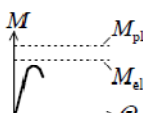

Querschnittsklasse	Momenten-Rotations-Verhalten	σ -Verlauf über den Querschnitt	Rotationsvermögen	Verfahren zur Bestimmung der Beanspruchungen	Verfahren zur Bestimmung der Beanspruchbarkeit	Anmerkungen
1			hoch	plastisch	plastisch	Querschnitte der QK 1 erreichen das volle plastische Moment und verfügen über ein ausgeprägtes Rotationsvermögen, so dass sich Fließgelenke einstellen können.
2			gering	elastisch	plastisch	Querschnitte der QK 2 erreichen das volle plastische Moment, verfügen aber nur über ein geringes Rotationsvermögen, so dass Fließgelenke nicht unterstellt werden dürfen.
3			keines	elastisch	elastisch	Querschnitte der QK 3 ermöglichen die Ausnutzung des elastischen Moments ohne Beulen der Querschnittsteile, das plastische Moment wird jedoch nicht erreicht.
4			keines	elastisch	elastisch, am effektiven Querschnitt	Querschnitte der QK 4 versagen durch lokales Beulen bereits vor Erreichen des elastischen Moments. Effektive Breiten nach EC 3-1-5, Kap. 5.2.2 verwenden.

Abb.2.1: Quelle: [EN 1993-1-1, Abs.5.5.2], Ausgabe 2010

Bei der Bestimmung der Querschnittsklasse ist folgendes zu Beachten:

QK hängen stets von der Querschnittsform und dem Belastungszustand des Querschnitts ab. Mit der QK für reine Druckbeanspruchung liegt man für alle anderen möglichen Schnittgrößenkombinationen auf der sicheren Seite, was aber mitunter sehr unwirtschaftlich ist.

Rein auf Zug beanspruchte Querschnitte oder Querschnittsteile werden keiner QK zugeordnet, da kein lokales Ausbeulen zu befürchten ist.

Allgemeine Vorgehensweise bei der Einstufung eines Querschnitts:

→ bei beliebig, auf Druck und/ oder Biegung beanspruchten Querschnitten wird jedem einzelnen Querschnittsteile nach den Abb.2.2.3 bis Abb.2.2.6 eine QK zugeordnet.

→ Querschnittsteile, die nicht mindestens die Grenzwerte der QK 3 erfüllen, sind in QK 4 einzustufen.

→ Die QK für den Gesamtquerschnitt ergibt sich als die höchste QK seiner Querschnittsteile.

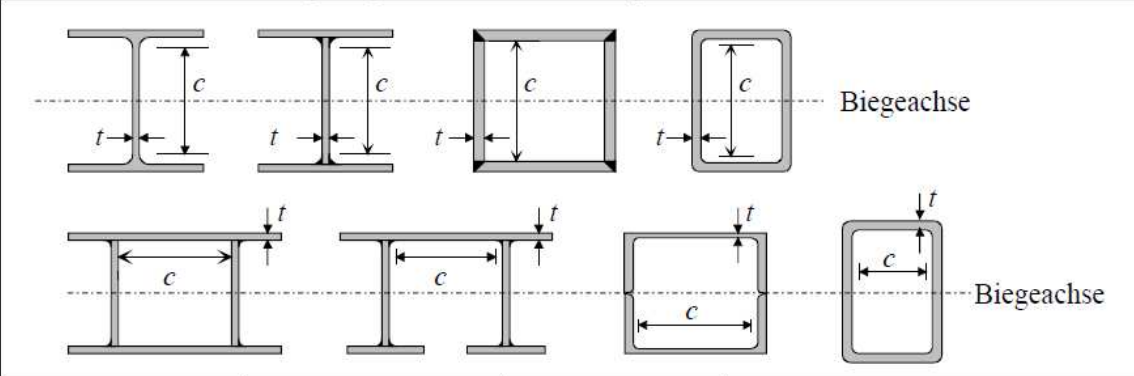
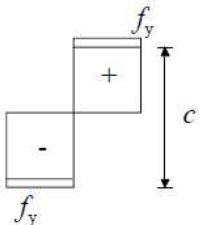
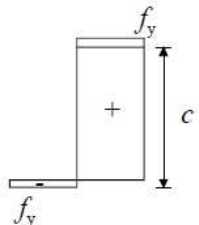
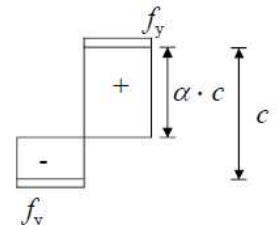
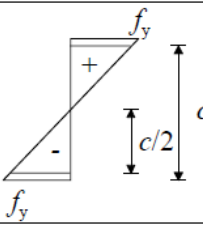
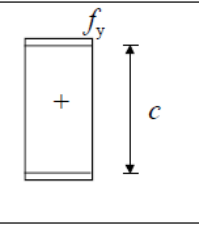
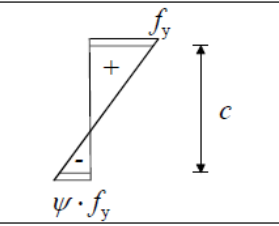
→ Bei der Einstufung eines Querschnitts in eine QK gibt es zahlreiche Ergänzungen/ Sonderregelung. Diese sind bei Anwendung der Einstufung von Querschnitten zu beachten.

Materialparameter für den Gebrauch der Tafeln (Abb.2.3.3 bis Abb.2.2.6):

$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y in N/mm ²	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

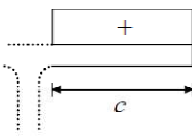
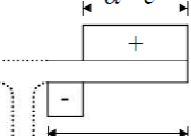
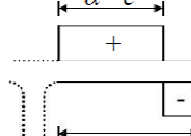
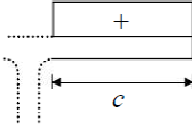
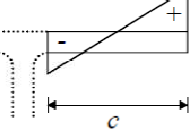
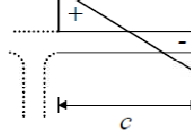
Abb.2.2: Quelle: [EN 1993-1-1, Tab.5.2], Ausgabe 2010

Abb.2.3: QK für beidseitig (!) gestützte, druckbeanspruchte Querschnittsteile:

			
Querschnittsklasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile
Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)			
1	$c/t \leq 72 \cdot \varepsilon$	$c/t \leq 33 \cdot \varepsilon$	$\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1}$ $\alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha}$
2	$c/t \leq 83 \cdot \varepsilon$	$c/t \leq 38 \cdot \varepsilon$	$\alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456 \cdot \varepsilon}{13 \cdot \alpha - 1}$ $\alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5 \cdot \varepsilon}{\alpha}$
Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)			
3	$c/t \leq 124 \cdot \varepsilon$	$c/t \leq 42 \cdot \varepsilon$	$\psi > -1: c/t \leq \frac{42 \cdot \varepsilon}{0,67 + 0,33 \cdot \psi}$ $\psi \leq -1^1): c/t \leq 62 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi) \sqrt{-\psi}$
¹⁾ Es gilt $\psi \leq -1$, falls entweder die Druckspannungen $\sigma \leq f_y$ oder die Dehnungen infolge Zug $\varepsilon_y > f_y / E$ sind.			

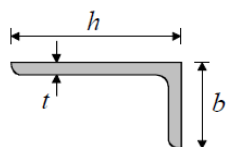
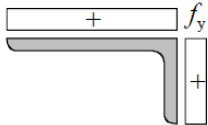
(Quelle: [EN 1993-1-1, Tab.5.2], Ausgabe 2010)

Abb.2.4: QK für einseitig (!) gestützte, druckbeanspruchte Bleche:

Gewalzte Querschnitte		Geschweißte Querschnitte	
Querschnittsklasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile	
		freier Rand im Druckbereich	freier Rand im Zugbereich
Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)			
1	$c/t \leq 9 \cdot \varepsilon$	$c/t \leq \frac{9 \cdot \varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9 \cdot \varepsilon}{\alpha \cdot \sqrt{\alpha}}$
2	$c/t \leq 10 \cdot \varepsilon$	$c/t \leq \frac{10 \cdot \varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10 \cdot \varepsilon}{\alpha \cdot \sqrt{\alpha}}$
Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)			
3	$c/t \leq 14 \cdot \varepsilon$	$c/t \leq 21 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}$ k_σ nach EC 3-1-5, siehe auch Tafel 8.47	

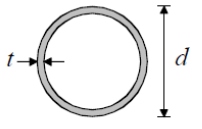
(Quelle: [EN 1993-1-1, Tab.5.2], Ausgabe 2010)

Abb.2.5: QK von druckbeanspruchten Winkelprofilen:

		<ul style="list-style-type: none"> • Siehe auch „einseitig gestützte Bleche“ nach Tafel 8.10a. • Diese Tabelle gilt nicht für Winkel mit über die Länge durchgehender Verbindung zu anderen Bauteilen.
Querschnittsklasse	Auf Druck beanspruchte Winkelschenkel	
Spannungsverteilung über das Querschnittsteil (Druck positiv)		
3	$h/t \leq 15 \cdot \varepsilon$ und gleichzeitig $\frac{b+h}{2 \cdot t} \leq 11,5 \cdot \varepsilon$	

(Quelle: [EN 1993-1-1, Tab.5.2], Ausgabe 2010)

Abb.2.6: QK von druckbeanspruchten, runden Hohlprofilen:

Querschnittsklasse		Auf Druck beanspruchte, runde Hohlprofile
1		$d/t \leq 50 \cdot \varepsilon^2$
2		$d/t \leq 70 \cdot \varepsilon^2$
3		$d/t \leq 90 \cdot \varepsilon^2$ (Für $d/t > 90 \cdot \varepsilon^2$ siehe EC 3-1-6.)

(Quelle: [EN 1993-1-1, Tab.5.2], Ausgabe 2010)

→ Wird bei der Einstufung auch nur ein Teilquerschnitt der Querschnittsklasse 4 zugewiesen, so erfolgt die Berechnung des gesamten Querschnitts nach Querschnittsklasse 4, d.h. nach [EN 1993-1-3].

2.3 Grundlagen der Tragwerksbemessung nach [EN 1993-1-3]

2.3.1 Geregelte Werkstoffe

Abb.2.7: Nennwerte der Basisstreckgrenze f_{yb} und der Zugfestigkeit f_u :

Stahlsorte	Norm	Sorte	f_{yb} in N/mm ²	f_u in N/mm ²
Warmgewalzte nicht legierte Baustähle; Teil 2: Technische Lieferbedingungen für nicht legierte Baustähle	EN 10025-2	S 235 S 275 S 355	235 275 355	360 430 510
Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 3: Technische Lieferbedingungen normalisierter, gewalzter, schweißbarer Feinkornbaustähle	EN 10025-3	S 275 N S 355 N S 420 N S 460 N S 275 NL S 355 NL S 420 NL S 460 NL	275 355 420 460 275 355 420 460	370 470 520 550 370 470 520 550
Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 4: Technische Lieferbedingungen thermomechanisch gewalzter, schweißbarer Feinkornbaustähle	EN 10025-4	S 275 M S 355 M S 420 M S 460 M S 275 ML S 355 ML S 420 ML S 460 ML	275 355 420 460 275 355 420 460	360 450 500 530 360 450 500 530

(Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Tab. 3.1a, Seite 15)

Andere Stahlwerkstoffe sind in den jeweiligen nationalen Anhängen geregelt.

Abb.2.8: Beispiele für weitere geregelte Stahlsorten:

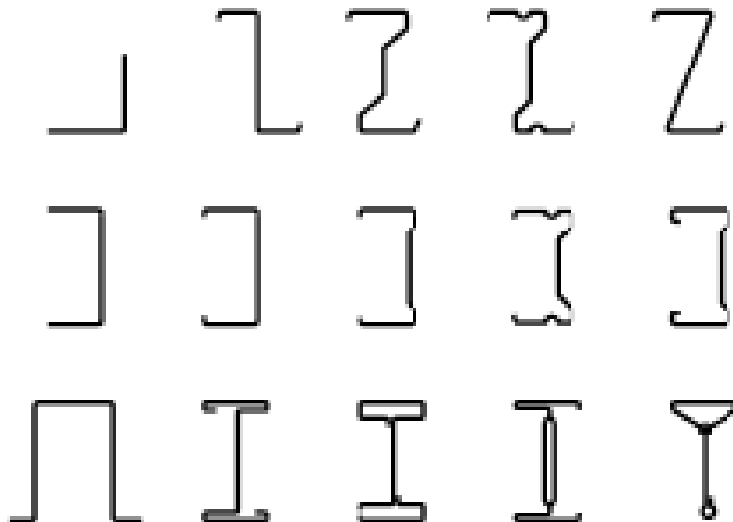
Stahlsorte	Norm	Sorte	f_{ys} in N/mm ²	f_t in N/mm ²
Kontinuierlich kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus allgemeinen Baustählen	ISO 4957	CR 220 CR 250 CR 320	220 250 320	300 330 400
Kontinuierlich feuerverzinktes Blech aus unlegierten Baustählen	EN 10326	S220GD-Z S250GD-Z S280GD-Z S320GD-Z S350GD-Z	220 250 280 320 350	300 330 360 390 420
Warmgewalzte Flacherzeugnisse aus hochfesten Stählen zur Kaltumformung. Teil 2: Lieferbedingungen für thermomechanisch gewalzte Stähle	EN 10149-2	S 315 MC S 355 MC S 420 MC S 460 MC S 500 MC S 550 MC S 600 MC S 650 MC S 700 MC	315 355 420 460 500 550 600 650 700	390 430 480 520 550 600 650 700 750
	EN 10149-3	S 260 NC S 315 NC S 355 NC S 420 NC	260 315 355 420	370 430 470 530
Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen	EN 10268	H240LA H280LA H320LA H360LA H400LA	240 280 320 360 400	340 370 400 430 460
Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen	EN 10292	H260LAD H300LAD H340LAD H380LAD H420LAD	240 ^b 280 ^b 320 ^b 360 ^b 400 ^b	340 ^b 370 ^b 400 ^b 430 ^b 460 ^b
Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus Stahl mit Zink-Aluminium- Überzügen (ZA)	EN 10326	S220GD-ZA S250GD-ZA S280GD-ZA S320GD-ZA S350GD-ZA	220 250 280 320 350	300 330 360 390 420
Kontinuierlich schmelztauchveredeltes Band und Blech aus Stahl mit Aluminium-Zink- Überzügen (AZ)	EN 10326	S220GD-AZ S250GD-AZ S280GD-AZ S320GD-AZ S350GD-AZ	220 250 280 320 350	300 330 360 390 420
Kontinuierlich feuerverzinktes Band und Blech aus unlegierten Stählen zur Kaltverformung	EN 10327	DX51D+Z DX52D+Z DX53D+Z	140 ^a 140 ^a 140 ^a	270 ^a 270 ^a 270 ^a
^a Mindestwerte für Streckgrenze und Zugfestigkeit sind in dieser Norm nicht enthalten. Für jede Stahlsorte darf ein Mindestwert von 140 N/mm ² für die Streckgrenze und 270 N/mm ² für die Zugfestigkeit angenommen werden. ^b Die Streckgrenzenwerte in der Werkstoffbezeichnungen beziehen sich auf die Eigenschaften senkrecht zur Walzrichtung. Die Werte für Längszug sind in der Tabelle enthalten.				

(Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Tab. 3.1b, Seite 16)

2.3.2 Querschnittsformen/ Bauteilformen

Typische Formen kaltgewalzter Querschnitte:

- Abb.2.9: Einzelne offene Querschnitte:



- Abb.2.10: Offene, zusammengesetzte Querschnitte:

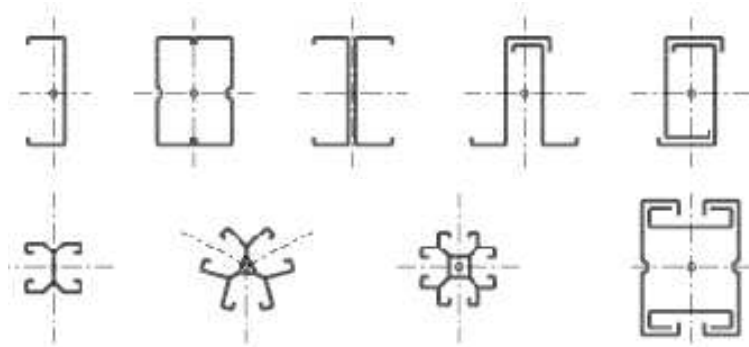


- Abb.2.11: Geschlossene, zusammengesetzte Querschnitte:

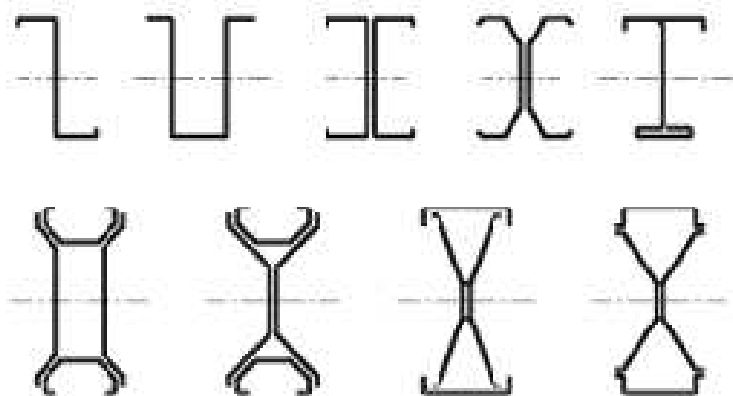


Typische Formen kaltgeformter Bauteile und Profilbleche

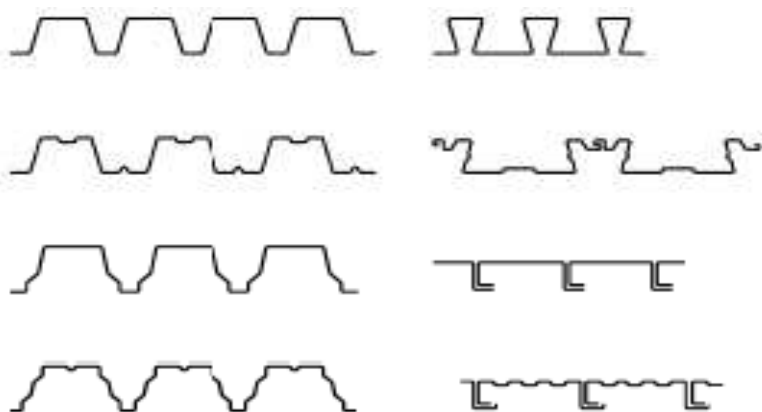
- Abb.2.12: Druck- und Zuglieder:



- Abb.2.13: Träger und Bauteile für Biegebeanspruchung:



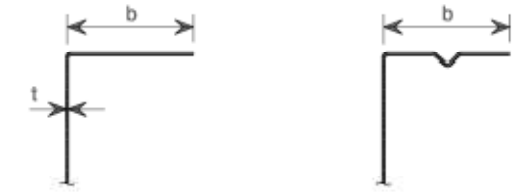
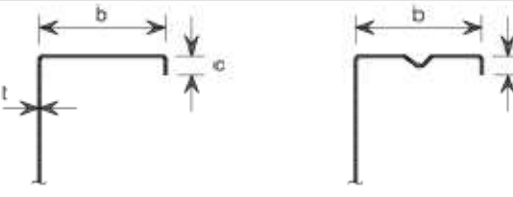
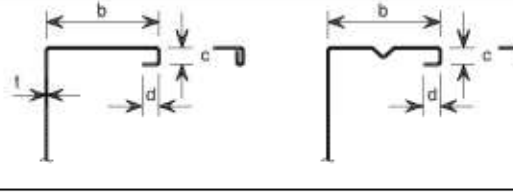
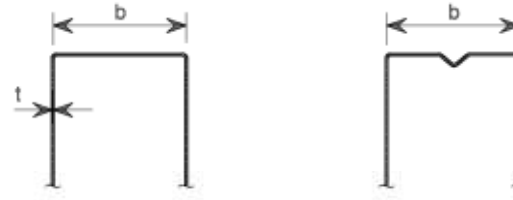
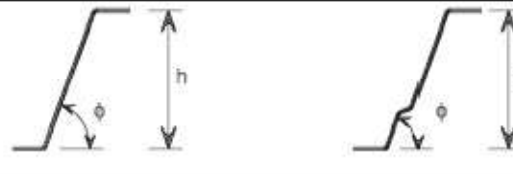
- Abb.2.14: Profilbleche als Faltwerke und Kassettenprofile:



2.3.3 Maximale Breiten-Dicken-Verhältnisse

Die Berechnung nach [EN 1993-1-3] darf nur dann erfolgen, wenn die Bereichsgrenzen in Abb.2.3.1 eingehalten werden. Außerhalb dieser Grenzbereiche liegen keine ausreichenden Versuchsergebnisse und Erfahrungswerte vor, um eine sichere Anwendung zu gewährleisten.

Abb.2.15: Bereichsgrenzen zur Anwendung des [EN 1993-1-3]:

Querschnittsteilfläche	Maximalwert
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$
	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

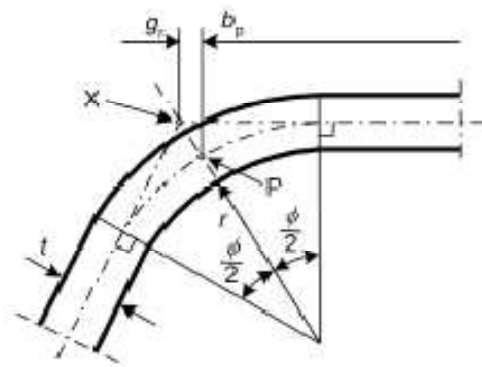
(Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Tab. 5.1, Seite 24)

Steifen dürfen nur dann rechnerisch berücksichtigt werden, wenn:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6$$

$$0,1 \leq d/b \leq 0,3$$

2.3.4 Einfluss ausgerundeter Ecken



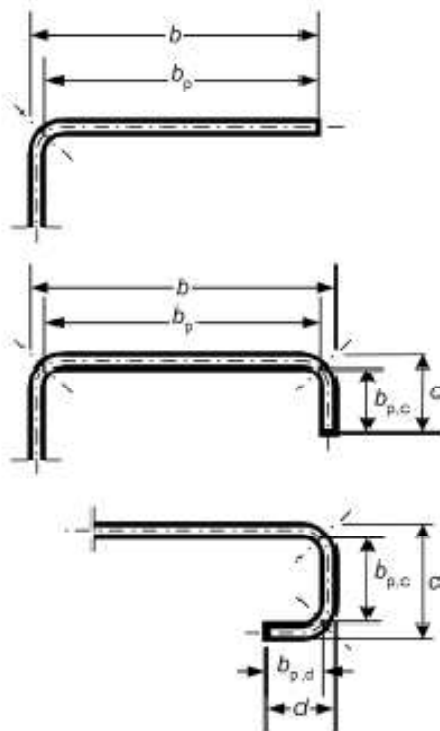
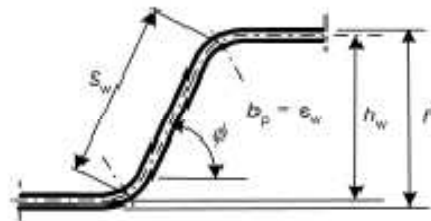
a) Mittelpunkt der Ecke oder Biegung

X ist der Schnittpunkt der Mittellinien

P ist der Mittelpunkt der Ecke

$$r_m = r + t/2$$

$$g_r = r_m \left(\tan\left(\frac{\phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \right)$$

b) Nennwert der geraden Breite b_p ebener Flanschstückec) Nennwert der geraden Breite b_p eines Steges

(b_p = abgeschrägte Höhe s_w)

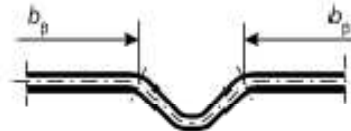
d) Nennwert der geraden Breite b_p ebener Teile, die an eine Stegsteife angrenzene) Nennwert der geraden Breite b_p ebener Teile, die an eine Flanschsteife angrenzen

Abb.2.16: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.1, Seite 21

Beim vereinfachten Verfahren darf der Einfluss ausgerundeter Ecken vernachlässigt werden, wenn: $r \leq 5 \cdot t$ und $r \leq 10 \cdot b_p$

2.3.5 Maßgebende Versagensformen druckbeanspruchter C- Profile

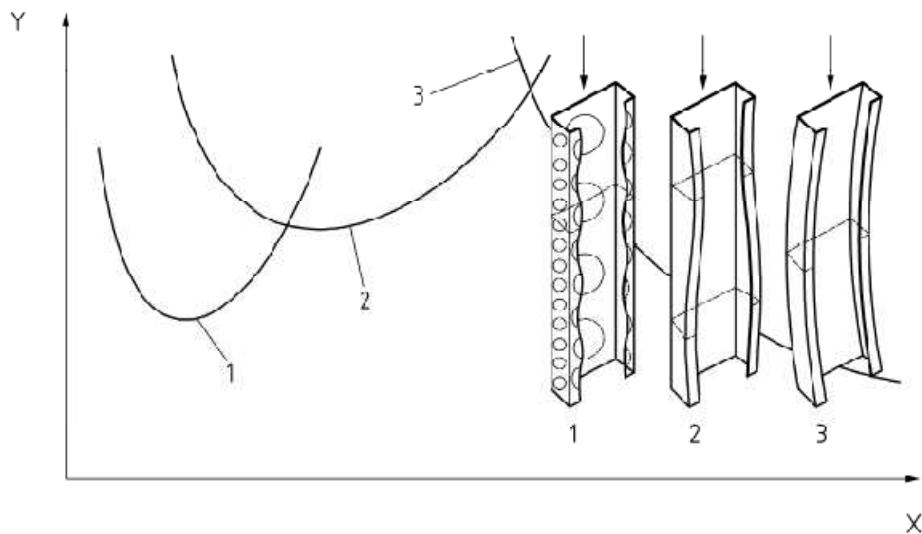


Abb.2.17: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.5a, Seite 28

Legende:	1	Lokales Blechbeulen
	2	Forminstabilität des Querschnitts
	3	Instabilität des Gesamtbauteils
	X	Halbwellenlänge
	Y	Knickspannung

→ Der Nachweis gegen lokales Blechbeulen erfolgt auf Grundlage wirksamer Breiten und der daraus berechneten effektiven Querschnittswerte.

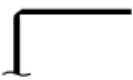

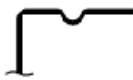
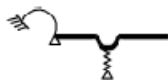

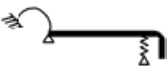
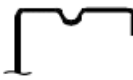

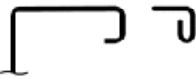
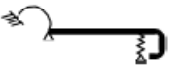

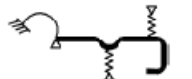
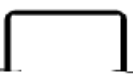
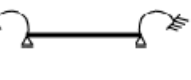
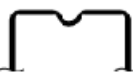





→ Beim Nachweis gegen Forminstabilität wird für Rand- und Zwischensteifen, oder anderen Querschnittsteilen, die der Forminstabilität unterliegen, auf Grundlage der kleinsten Verzweigungslast die abgeminderte Dicke berechnet.

→ Der Nachweis des Gesamtbauteils (Gesamtstabilität) wird auf Grundlage wirksamer Querschnitte geführt.

2.3.6 Modellierung von Querschnittsteilen

Bevor Querschnittsteile nach [EN 1993-1-3] berechnet werden können, müssen diese modelliert werden. Werden keine genauen Modelle nach [EN 1993-1-5] verwendet, dürfen die einzelnen Querschnittsteile wie folgt modelliert werden:

Abb.2.18: Modellierung von Querschnittsteilen:

Elementtyp	Modell	Elementtyp	Modell
			
			
			
			
			

(Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.2, Seite 25)

Es erfolgt eine Unterteilung in ebene nichtausgesteifte Querschnittsteile und ebene Querschnittsteile mit Rand- oder Zwischensteifen.

→ Bei ebenen nichtausgesteiften Querschnittsteilen ist die wirksame Breit b_p eines Elements nach Abb.2.16 zu bestimmen.

→ Die Bemessung ebener Querschnittsteile mit Rand- oder Zwischensteifen basiert auf der Annahme, dass sich die Steife wie ein Druckglied mit einer durchgehenden, teilweisen Verschiebungsbehinderung verhält.

Die Federsteifigkeit K ist zu ermitteln!

2.3.7 Ermittlung der Federsteifigkeiten

Für Randsteifen allgemein gilt:

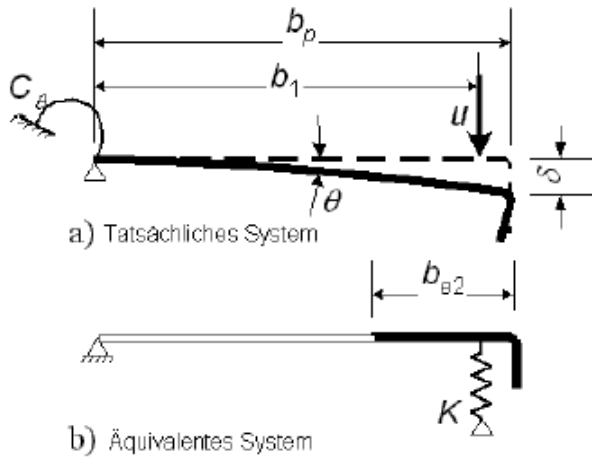


Abb.2.19: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.6, Seite 30

→ Verformung:
$$\delta = \theta \cdot b_p + \frac{u \cdot b_p^3}{3} \cdot \frac{12 - (1 - \nu^2)}{E \cdot t^3} \quad \text{mit:} \quad \theta = u \cdot \frac{b_p}{C_\theta}$$

Für C- und Z- Profile mit Lippe gilt:

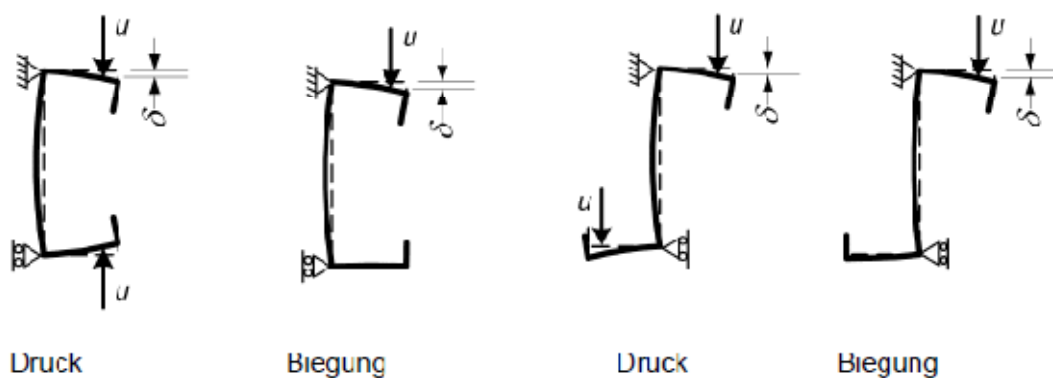


Abb.2.20: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.6, Seite 30

→ Federsteifigkeit:
$$K = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f}$$

Für Zwischensteifen gilt:

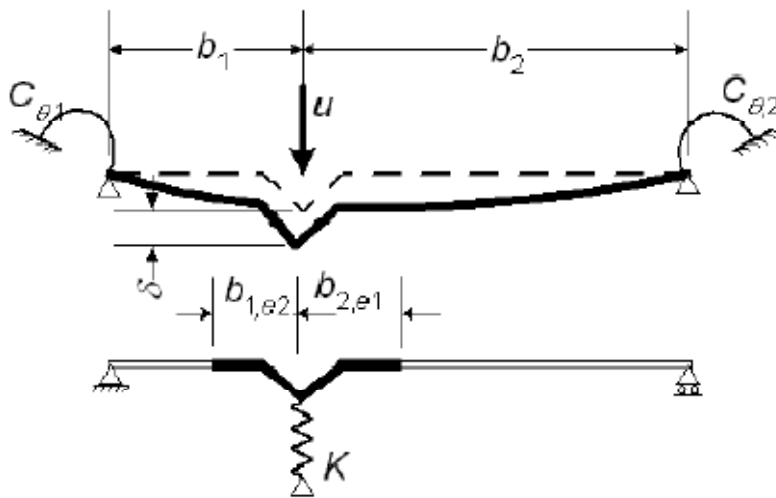


Abb.2.21: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.6, Seite 30

→ Verformung:
$$\delta = \frac{u \cdot b_1^2 \cdot b_2^2}{3(b_1 + b_2)} \cdot \frac{12 - (1 - \nu^2)}{E \cdot t^3}$$

mit: $C_{\theta,1} = C_{\theta,2} = 0$ (konservative Annahme)

2.3.8 Allgemeines Vorgehen bei dünnwandigen Querschnitten mit Randversteifungen

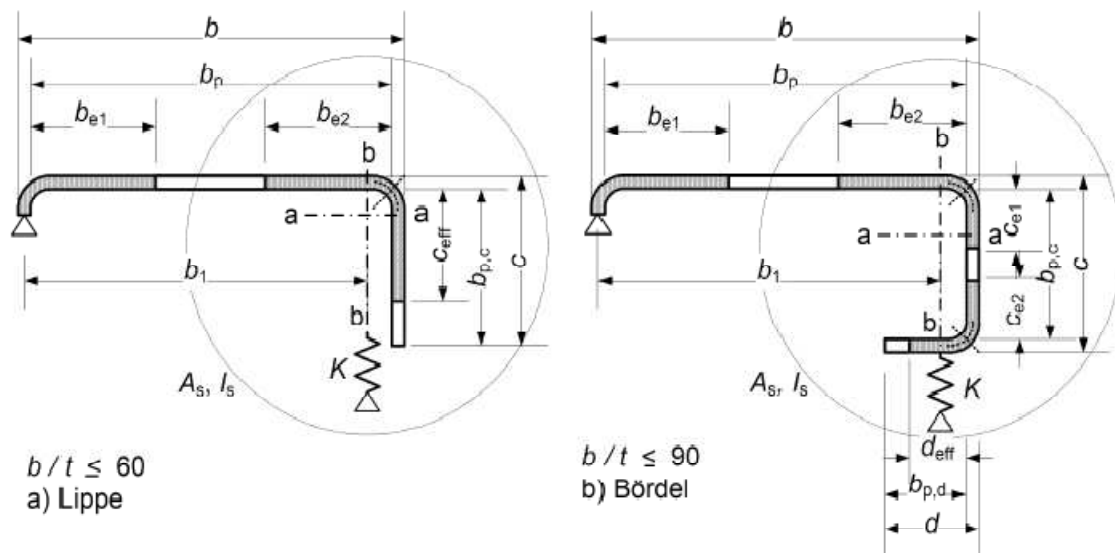


Abb.2.22: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.7, Seite 32

Randversteifungen: - Unterstützung der lokal beulgefährdeten Flansche
- Sind selber aber auch knickgefährdet

- Schritt 1: Ermittlung eines ersten Ansatzes für den wirksamen Querschnitt der Steife mit der Annahme, dass die Randsteife als festes Auflager wirkt und das $\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0}$ ist.
- Schritt 2: Verwendung des ersten wirksamen Ansatzes für den Querschnitt (siehe Schritt 1) zur Bestimmung des Abminderungsfaktors für die Forminstabilität des Querschnitts (entspricht dem Biegeknicken der Steife).
- Schritt 3: Iteration zur Verbesserung des Abminderungsfaktors für das Knicken der Randsteife.

→ Zur besseren Veranschaulichung werden die Schritte 1-3 auf der folgenden Seite ausführlicher und grafisch untermauert dargestellt.

Grafische Veranschaulichung des Vorgehens bei dünnwandigen Querschnitten mit Randversteifung:

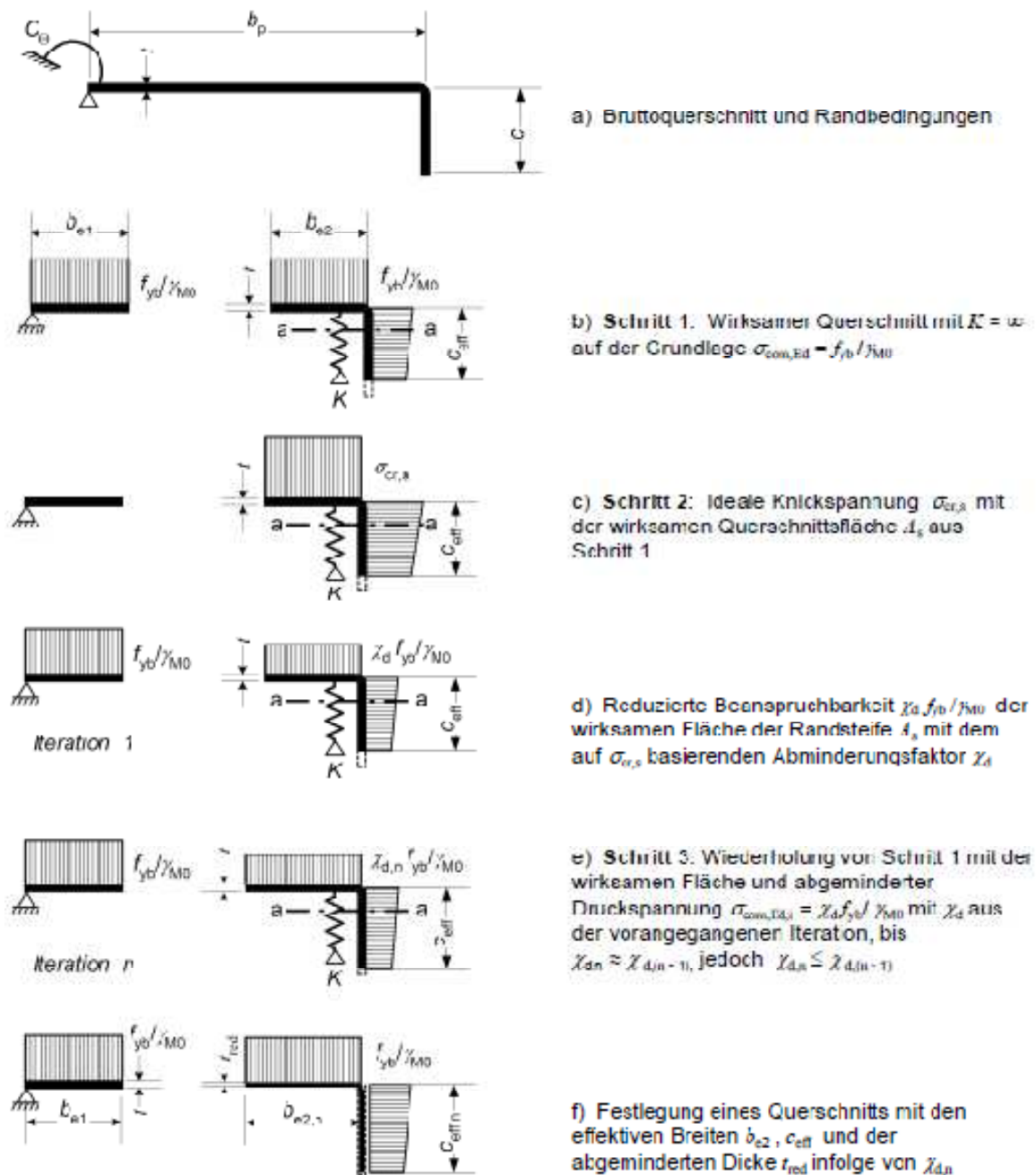
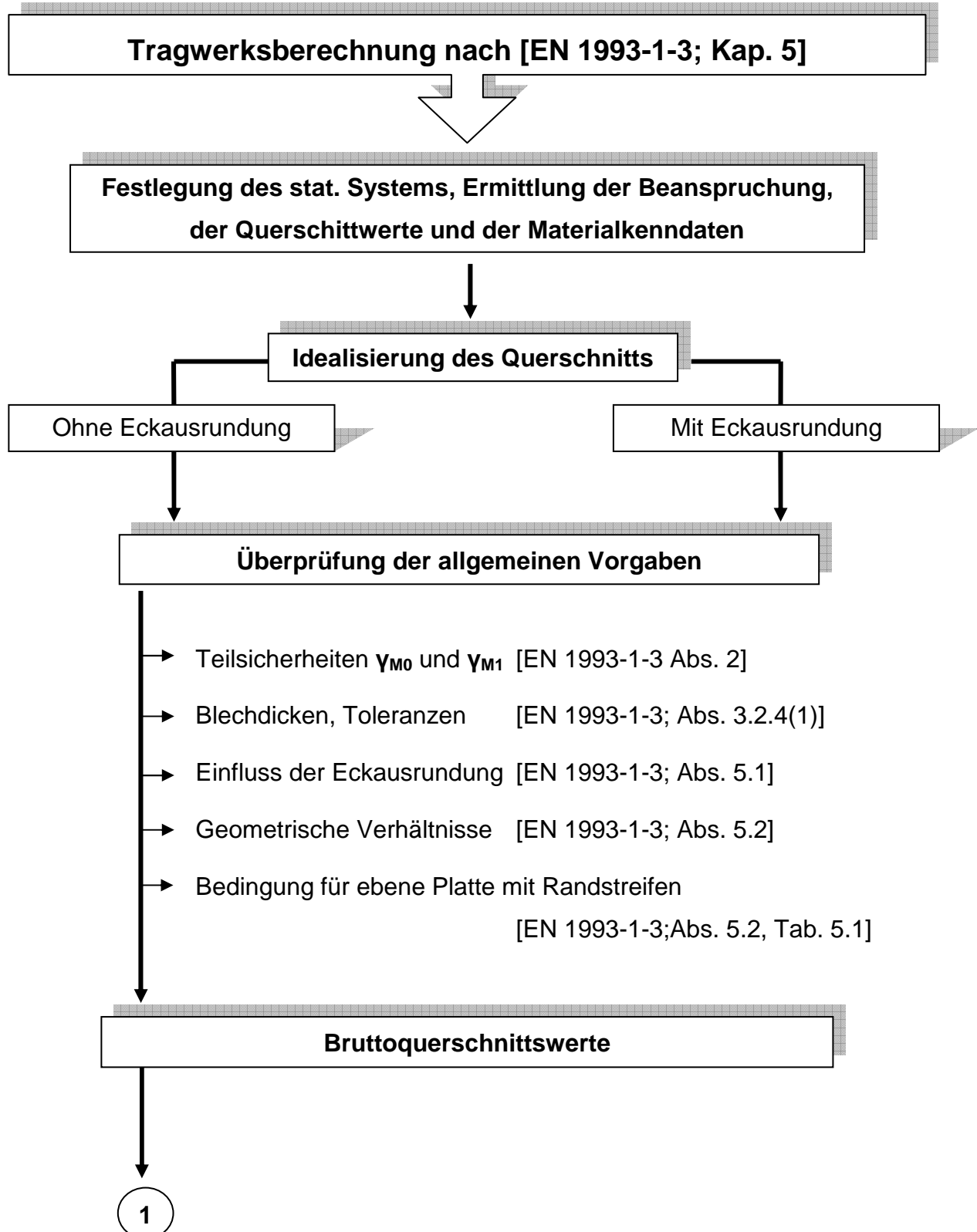
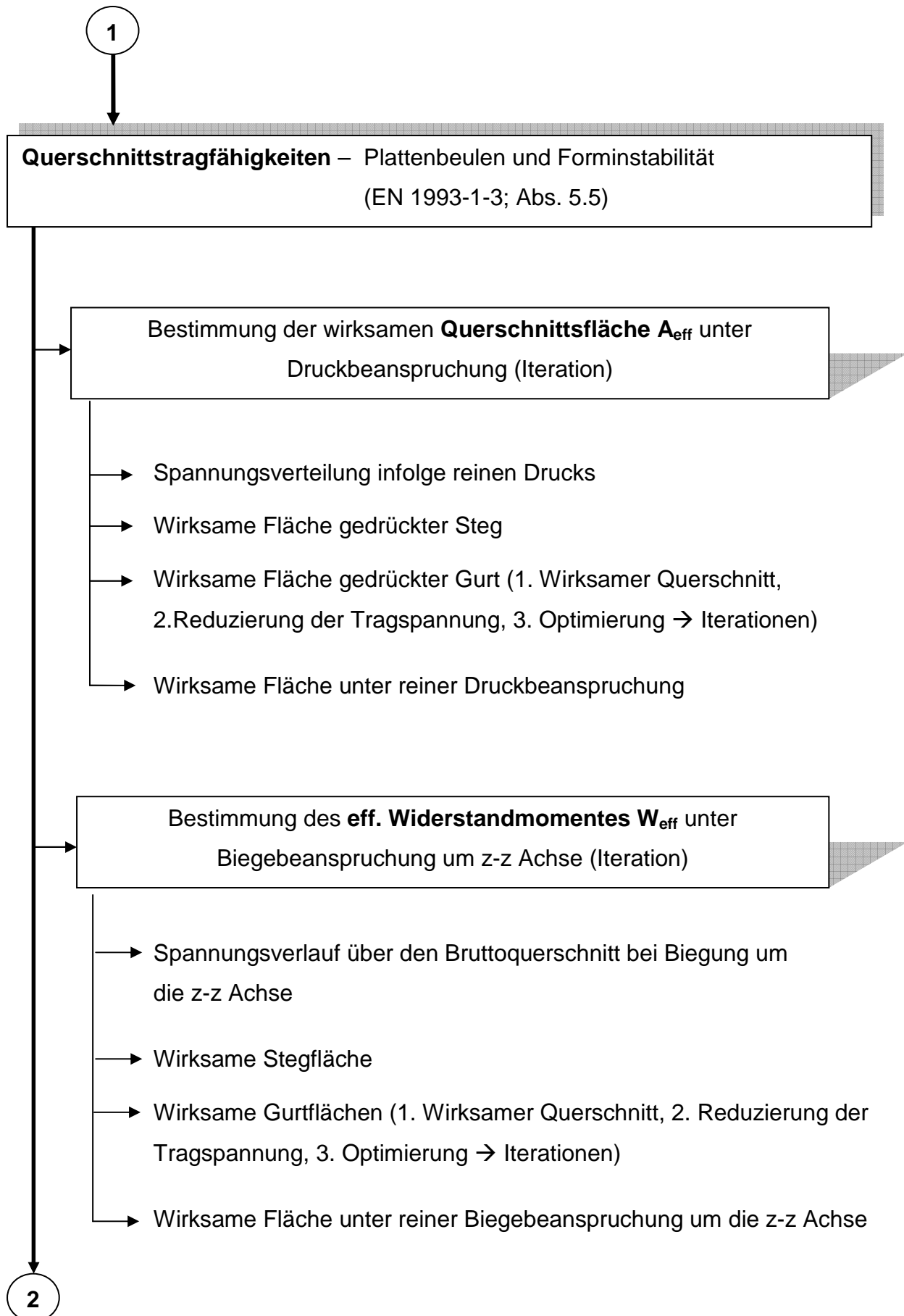


Abb.2.23: Quelle: [EN 1993-1-3], Ausgabe 2006, Bild 5.8, Seite 34

Die ausführliche Beschreibung des allgemeinen Vorgehens bei der Berechnung dünnwandiger Querschnitte mit Randversteifungen, einschließlich aller notwendigen Formeln und Querverweise auf die [EN 1993-1-3] erfolgt im Kapitel 4 dieser Arbeit.

3. Schematische Darstellung des Bemessungsablaufs nach [DIN EN 1993-1-3]





2

Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit
[EN 1993-1-3; Abs. 6.1]

Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchung unter Berücksichtigung der
Gesamtstabilität [EN 1993-1-3; Abs. 6.2]

Beanspruchbarkeit des Druckstabes
[EN 1993-1-3; Abs. 6.2.2 und 6.2.3]

→ Biegeknicken [EN 1993-1-3; Abs. 6.2.2]

→ Biegedrillknicken [EN 1993-1-3; Abs. 6.2.3]

Biegedrillknickbeanspruchung des Biegeträgers
[EN 1993-1-3; Abs. 6.2.4]

Grenztragfähigkeit des wirksamen Querschnitts unter Druck-
und Biegebeanspruchung [EN 1993-1-3; Abs. 6.2.5]

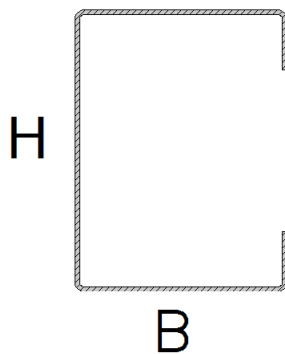
Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (Interaktion!)

4. Untersuchung ausgewählter dünnwandiger Querschnitte

4.1 Untersuchungsgegenstand

Nachfolgend wird die Tragfähigkeit verschiedener dünnwandiger kaltgeformter C-Profile mit Randversteifungen nach [EN 1993-1-3] berechnet.

Für die Untersuchung werden folgende Profiltypen herangezogen:



Bezeichnung: „C Höhe H / Breite B / Materialstärke“ (Außenabmessung)

- C 80/90/2
- C 90/90/2
- C 100/90/2
- C 110/90/2
- C 120/90/2

Die Querschnittstragfähigkeit der C-Profile wird durch die Beultragfähigkeit des Querschnittes in Kombination mit einem möglichen Biegeknicken der randversteiften Lippen bestimmt.

Die Grenztragfähigkeit der C-Profile wird dann unter Berücksichtigung der Überlagerung der lokalen und globalen Stabilitätsprobleme ermittelt.

Folgend soll nun untersucht werden, welche Auswirkungen es auf die Grenztragfähigkeit der C-Profile hat, wenn bei einer konstanten Breite von 90mm und einer Materialstärke von 2mm, die Steghöhe schrittweise um 10mm von 80mm auf 120mm erhöht wird.

Um Rückschlüsse aus den Berechnungen ziehen zu können und anschließend eine vergleichende Auswertung der Ergebnisse zu ermöglichen, wird allen 5 Profiltypen folgendes statisches System zugrunde gelegt:



Knicklänge: $L = 1500\text{mm}$

Lagerung: unteres Auflager = Festlager,
oberes Auflager = Loslager (vertikal verschieblich)

Randbedingungen:

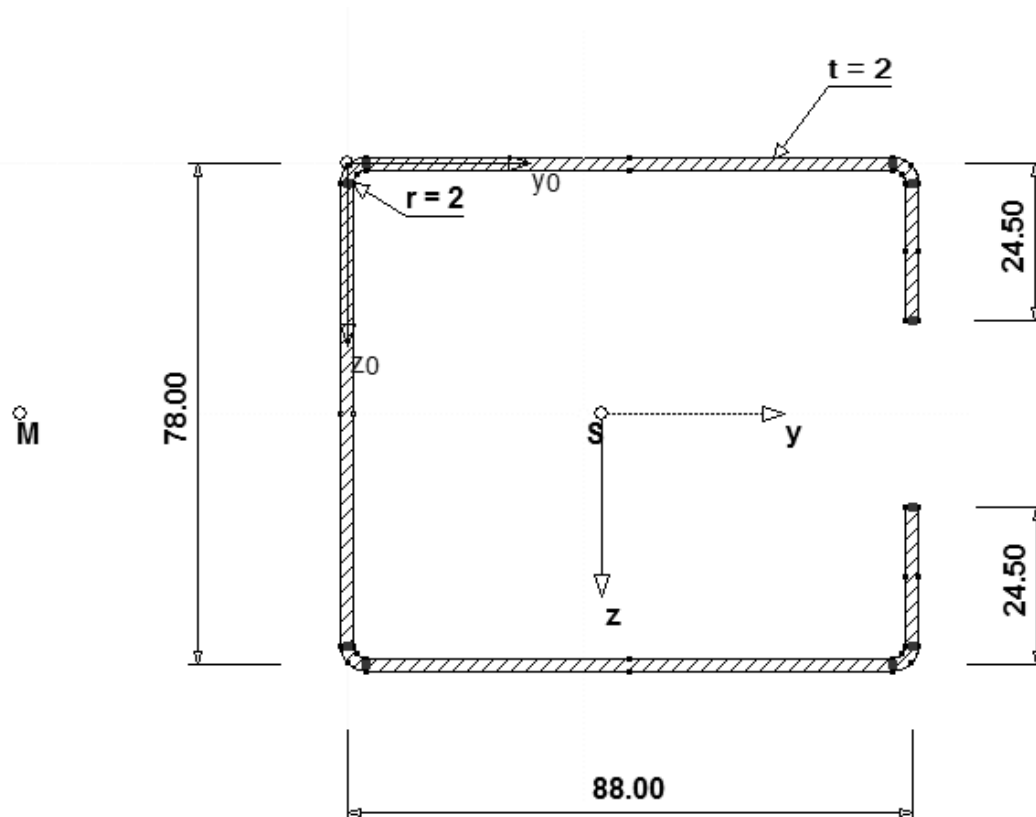
- keine Verdrillung
- keine Verformung in der Zeichenebene
- keine Wölbeinspannung

Die Grenztragfähigkeiten eines jeden Profiltyps können nun ermittelt werden. Durch die gleichen Randbedingungen werden die Ergebnisse sehr gut vergleichbar und können im Nachgang ausführlich analysiert und ausgewertet werden.

4.2 Querschnittsuntersuchung

4.2.1 Querschnitt C 80x90x2

→ Die Bemaßung bezieht sich auf die Querschnittsmittellinien.



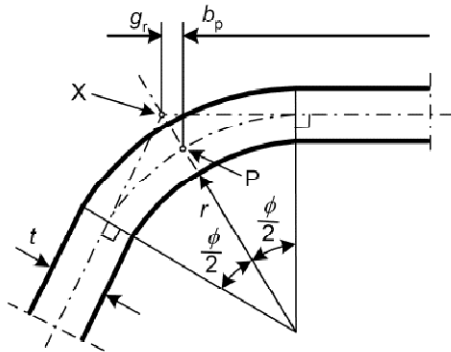
4.2.1.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung

Tab.4.1: Querschnittswerte C80/90/2

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Profilhöhe	h	80,00	mm
Profilbreite	b	90,00	mm
Blechdicke	t	2,00	mm
Lippenlänge	c	24,50	mm
Biegeradius (innen)	r	2,00	mm
Fläche	A	596	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung vom Steg	y_s	39,7	mm
Schwerpunktabstand in y-Richtung Von der Lippe	y_s'	48,3	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	I_y	67,34	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	I_z	68,74	cm ⁴
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 49,3mm)	$W_{z, lip}$	13,95	cm ³
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 40,7mm)	$W_{z, web}$	16,88	cm ³
Trägheitsradius	i_z	34,0	mm
Trägheitsradius	i_y	33,6	mm
Abstand Schubmittelpunkt von Schwerpunkt	y_0	90,5	mm
Torsionsträgheitsmoment	I_T	0,080	cm ⁴
Wölbwiderstand	$I_{<\omega>}$	1606,2	cm ⁶
Querschnittsstrecke	r_z	-9,7	mm

Querschnittsidealisierung:

Einfluss der Eckausrundung nach [EN 1993-1-1, Abs. 5.1]:



$$r_m = r + t / 2 = 2 + 1 = 3 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m \cdot (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 0,88 \text{ mm}$$

$$u = \frac{\pi}{2} \cdot r_m = \frac{\pi}{2} \cdot 3 = 4,71 \text{ mm}$$

$$x_m = 0,638 \cdot r_m = 0,638 \cdot 3 = 1,91 \text{ mm}$$

$$I_{y,RC} = I_{z,RC} = \frac{t \cdot r_m^3}{12} = \frac{2 \cdot 3^3}{12} = 4,5 \text{ mm}^4$$

Für die weitere Berechnung sind außerdem folgende Querschnittsabmessungen bezogen auf die Querschnittsmittellinien von Bedeutung:

Nennwert der geraden Höhe: $h_w = h - 2 g_r = 78 - 2 \cdot 0,88 = 76,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Breite: $b_p = b - 2 \cdot g_r = 88 - 2 \cdot 0,88 = 86,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Lippenlänge: $b_{p,c} = b_{bc,c} - g_r = 24,5 - 0,88 = 23,62 \text{ mm}$

4.2.1.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben

- *Teilsicherheitsbeiwert für das Material:*

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$$

→ laut nationaler Empfehlung ist für Deutschland $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$.
Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird aber nach allg. gültigem Eurocode, d.h. ohne nationale Empfehlung, mit $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ gerechnet!

- *Blechedicken und deren Toleranzen:*

Für Bleche und Träger gilt: $0,45\text{mm} \leq t_{\text{cor}} \leq 15\text{mm}$

$$t_{\text{vorh}} = t_{\text{cor}} = 2\text{mm}$$

→ Bedingung erfüllt!

- *Einfluss der Eckausrundungen:*

$$r/t = 3/2 = 1,5 \leq 5$$

$$r/\min(b_p, h_w) = 3/78 = 0,038 \leq 0,1$$

→ Der Einfluss der Eckausrundung darf vernachlässigt werden. Für die Berechnung der Bauteilsteifigkeit werden die Eckausrundungen aber immer berücksichtigt!

- *Geometrische Verhältnisse:*

$$b/t = 90/2 = 45 \leq 60$$

$$c/t = 25,5/2 = 12,75 \leq 50$$

$$h/t = 80/2 = 40 \leq 500$$

→ Bedingungen erfüllt!

- Zum Erlangen ausreichend hoher Steifigkeit und zur Vermeidung von vorzeitigen Versagen der Steifen sollten deren Abmessungen innerhalb folgender Grenze liegen:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6$$

$$c/b = 25,5/90 = 0,283$$

→ Bedingung erfüllt! Die Lippen können bei der Berechnung berücksichtigt werden.

- *Bedingungen für ebene Platten mit Randsteifen*

Der Winkel zwischen Steife und Blech beträgt 90° und befindet sich somit innerhalb der Grenzen von 45° - 135°

→ Die Berechnungsmethode für Randsteifen darf angewendet werden.

4.2.1.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung

- Spannungsverteilung infolge reinem Druck:

→ Die Spannung verteilt sich unter reiner Druckbeanspruchung gleichmäßig über den gesamten Querschnitt

Spannungsverhältnis: $\psi = 1$

Druckspannung: $\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges (einseitig gestützte Platte):

→ Steg: 4-seitig gelagerte Platte

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulslankheit: $\bar{\lambda}_p = \frac{h_w / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{76,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 0,824 \geq 0,673$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,824 - 0,055 \cdot 4}{0,824^2} = 0,889 \leq 1,0$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Steghöhe: $h_{eff} = \rho \cdot h_w = 0,889 \cdot 76,24 = 67,78 \text{ mm}$

$$h_{e1} = h_{e2} = 0,5 \cdot h_{eff} = 0,5 \cdot 67,78 = 33,89 \text{ mm}$$

$$h_{e1,c} = h_{e2,c} = 0,5 \cdot h_{eff} + g_r = 33,89 + 0,88 = 34,77 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

- Wirksame Fläche der gedrückten Gurte mit Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulschlankheit: $\overline{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 0,933 \geq 0,673$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2} = \frac{0,933 - 0,055 \cdot 4}{0,933^2} = 0,819 \leq 1,0$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten: $b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0,819 \cdot 86,24 = 70,63mm$
 $b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 70,63 = 35,32mm$
 $b_{e1,c} = b_{e2,c} = 0,5 \cdot b_{eff} + g_r = 35,32 + 0,88 = 36,20mm$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Randsteife (einseitig gestützte Platte)

Allgemeine Randbedingung:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert: Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulschlankheit:
$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:
$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} = 1,0 \cdot 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche:

$$A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$$

$$A_s = (36,20 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 118,82 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82} \right)$$

$$e_s = 5,062 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(36,20 - 3) \cdot 2 \cdot ((36,20 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 11,04 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 11,04 = 76,96 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$\begin{aligned}
 I_S &= 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3 \\
 &\quad + (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2 \\
 I_S &= 1/12 \cdot (36,20 - 3) \cdot 2^3 + (36,20 - 3) \cdot 2 \cdot 5,062^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3 \\
 &\quad + (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 5,062 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 5,062)^2 \\
 I_S &= 6778,8 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3; Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 76,96 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} \\
 K &= \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{76,96^2 \cdot 78 + 76,96^3 + 0,5 \cdot 76,96^2 \cdot 78 \cdot 1} \\
 K &= 0,402 \text{ N / mm}^2
 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,402 \cdot 210000 \cdot 6778,8}}{118,82} = 402,7 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{402,7}} = 0,939 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \overline{\lambda}_d$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,939 = 0,791$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

Reduzierte wirksame Steifenfläche unter Berücksichtigung des Knickens
der Randsteife:

$$A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}}$$

$$A_{S,red} = 0,791 \cdot 118,82 \cdot 1,0 = 93,99 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.17)

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

→ Wiederholung von **Schritt 1** mit den wirksamen Breiten der Randsteife infolge Forminstabilität unter Berücksichtigung der reduzierten Tragspannung

Reduzierter Schlankheitsgrad der Randsteife:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\chi_d} \quad (\text{EN 1993-1-3; Gl. 5.16})$$

→ Nachfolgend wird **Schritt 2** wiederholt, um den korrigierten Abminderungsfaktor für die Steife zu ermitteln, so lange bis gilt:

$$\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)} \rightarrow \text{jedoch: } \chi_{d,n} < \chi_{d(n-1)}$$

Es kann keine generelle Aussage getroffen werden, wie viele Iterationen durchzuführen sind. In diesem Fall sind 2 Iterationen ausreichend, um die Bedingung $\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)}$ zu erfüllen. Die Ergebnisse der Iterationen sind mit allen wichtigen Zwischenwerten in Tab. Xx zusammengefasst.

Tab.4.2: Iterationen zur Berechnung der reduzierten wirksamen Fläche der Randsteife

Parameter			Einheit	Ausgangswert	1. Iteration	2. Iteration
Ransteife	Abminderungs-faktor	$\chi_{d(n-1)}$	o.E.	1,000	0,791	0,785
Gurt Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 4$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,933	0,933	0,933
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,829	0,827
	Abminderungs-faktor	ρ	o.E.	0,819	0,886	0,888
	Wirksame Breite	$b_{e2,c}$	mm	36,20	39,09	39,17
Lippe Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 0,5$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,722	0,722	0,722
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,642	0,640
	Abminderungs-Faktor	ρ	o.E.	1,000	1,000	1,000
	Wirksame Breite	$c_{eff,c}$	mm	24,50	24,50	24,50
Randsteife	Wirksame Fläche	A_s	mm ²	118,82	124,6	124,8
	Abstand	e'_s	mm	5,062	4,828	4,820
		b_1	mm	76,96	75,73	75,70
	Trägheitsmoment	I_s	mm ⁴	6778,8	6921,9	6925,7
	Federsteifigkeit	K	N/mm ²	0,402	0,418	0,418
	Verzweigungs-Spannung	$\sigma_{cr,s}$	N/mm ²	402,7	395,7	395,1
	Abminderungs-Faktor	$\chi_{d,n}$	o.E.	0,791	0,785	0,785
	Reduzierte Wirksame Fläche	$A_{s,red}$	mm ²	93,99	97,81	97,97

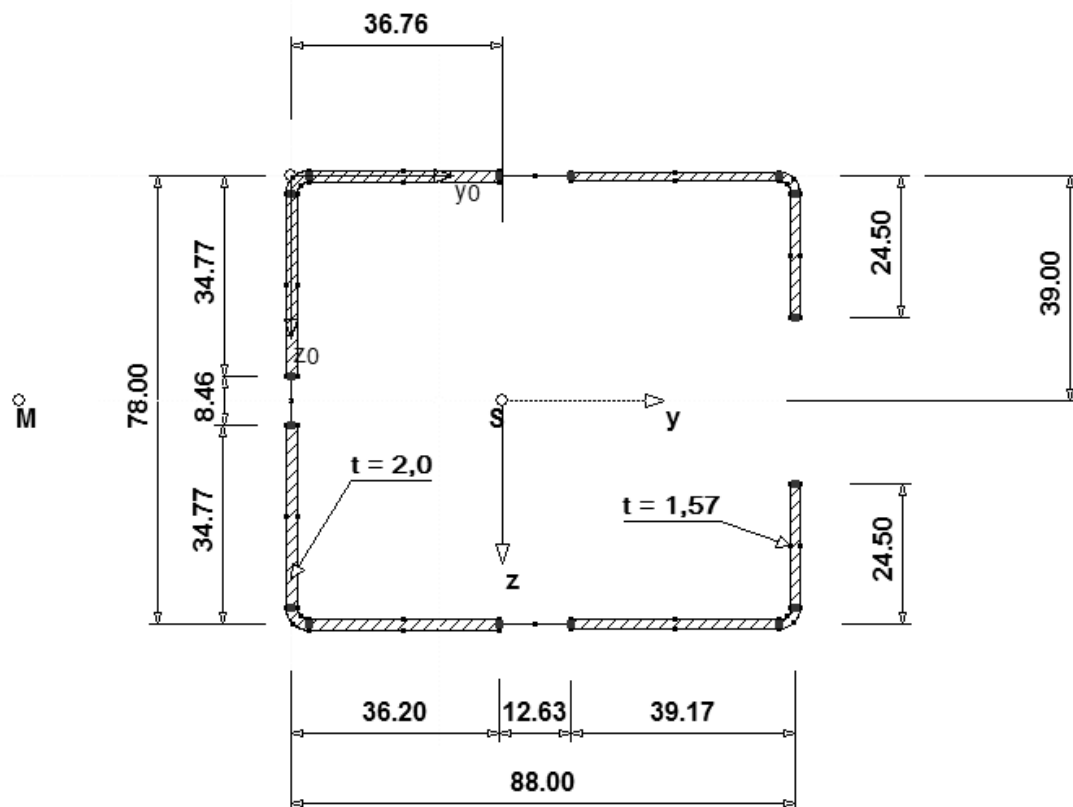
Querschnittswerte der reduzierten wirksamen Randsteife (Ergebnis der Iteration)

Gurt: $b_{e1,c} = 36,20\text{mm}$ $b_{e2,c} = 39,17\text{mm}$

Steg: $h_{e1,c} = h_{e2,c} = 34,77\text{mm}$

Lippe: $c_{\text{eff},c} = 24,50\text{mm}$

Randsteife: $t_{\text{red}} = t \cdot \frac{A_{s,\text{red}}}{A_s} = \chi \cdot t = 0,785 \cdot 2 = 1,57\text{mm}$



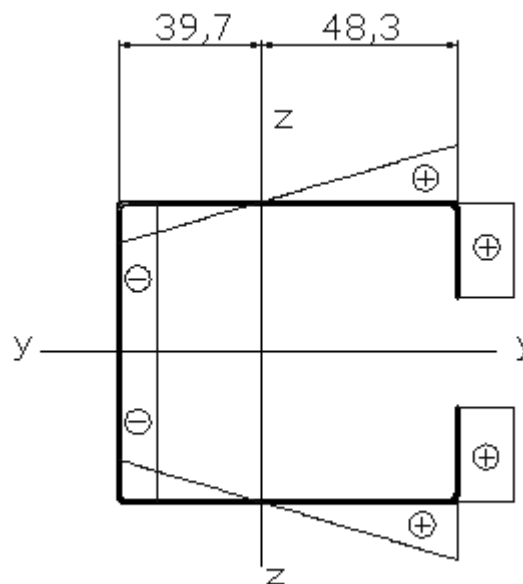
Tab.4.3: Effektive Querschnittswerte unter Druckbeanspruchung:

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Fläche	A_{eff}	475	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung	$Y_{s,\text{eff}}$	36,76	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	$I_{\text{eff},y}$	53,12	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	$I_{\text{eff},z}$	57,71	mm
Schwerpunktverschiebung in y- Richtung $e_{N,Y} = y_s - y_{s,\text{eff}} = 39,7\text{mm} - 36,76\text{mm}$	$e_{N,Y}$	2,94	mm

4.2.1.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse

Während der Bruttoquerschnitt einer reinen Druckbeanspruchung unterliegt, wird der wirksame Querschnitt nun durch Druck- und gleichzeitige Biegebeanspruchung um die z-z-Achse belastet. Dies resultiert aus der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirksamen Querschnitt in Richtung der y-y-Achse, die aufgrund der nunmehr exzentrischen Normalkraft am wirksamen Querschnitt eine zusätzliche Biegebeanspruchung M_z hervorruft. Somit muss folgend die Biegetragfähigkeit des dünnwandigen Querschnitts bestimmt werden.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse (Druck positiv):



Spannungsverhältnis:
$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-(b_t - g_r)}{b_c - g_r}$$

$$\psi = \frac{-(39,7 - 0,88)}{48,3 - 0,88} = -0,819$$

Druckspannung:
$$\sigma_{\text{cam,ED}} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = \text{const.}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges:

Steg ist zugbeansprucht → Steg ist voll wirksam

- Wirksame Fläche der Gurte mit gedrückter Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert:

$$k_{\sigma} = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,819) + 9,78 \cdot (-0,819)^2$$

$$k_{\sigma} = 19,52 \quad (\text{EN 1993-1-5, Tab. 4.1})$$

Beulschlankheit:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{19,52}} = 0,422 \leq 0,861$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0$ (EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p / (1 - \psi) = 1,0 \cdot 86,24 / (1 - (-0,819)) = 47,41 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 47,41 = 18,97 \text{ mm}$$

$$b_{e1,c} = b_{e1} + g_r = 18,97 + 0,88 = 19,85 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 47,41 = 28,45 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Bezeichnung nach EN 1993-1-3:

$$b_{e1,web,c} = b_t + b_{e2} = 39,7 + 28,45 = 68,15 \text{ mm}$$

$$b_{e2,lip,c} = b_{e1,c} = 19,85 \text{ mm}$$

Randsteife (einseitig gestützte Platte)

Allgemeine Randbedingung:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert:

Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulschlankheit:

$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$c_{eff} = \rho * b_{p,c} = 1,0 * 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche: $A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$

$$A_s = (19,85 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 86,12 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{86,12} \right)$$

$$e_s = 6,98 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(19,85 - 3) \cdot 2 \cdot ((19,85 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{86,12}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 4,59 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 4,59 = 83,41 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$\begin{aligned}
 I_S &= 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3 \\
 &\quad + (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2 \\
 I_S &= 1/12 \cdot (19,85 - 3) \cdot 2^3 + (19,85 - 3) \cdot 2 \cdot 6,98^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3 \\
 &\quad + (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 6,98 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 6,98)^2
 \end{aligned}$$

$$I_S = 5611,6 \text{ mm}^4$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 83,41 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f}$$

$$K = \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{83,41^2 \cdot 78,0 + 83,41^3 + 0,5 \cdot 83,41^2 \cdot 78,0 \cdot 1}$$

$$K = 0,331 \text{ N / mm}^2$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,331 \cdot 210000 \cdot 5611,6}}{86,12} = 458,66 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad: $\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{458,66}} = 0,880 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \overline{\lambda}_d$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,880 = 0,833$$

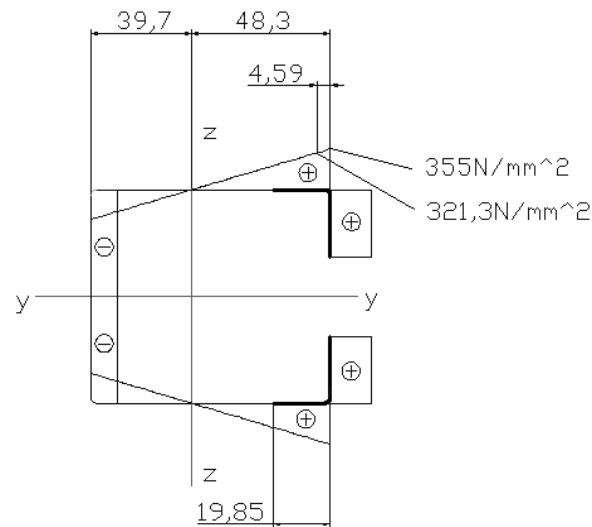
(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife:

$$A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}} \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.17})$$

→ Dabei ist $\sigma_{com,ED}$ die am wirksamen Querschnitt ermittelte
Druckspannung in der Schwerlinie der Steife.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse:



$$\sigma_{com,ED} = \frac{355 \cdot (48,3 - 4,59)}{48,3} = 321,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow A_{S,red} = \chi_d \cdot A_S \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}} = 0,833 \cdot 86,12 \cdot \frac{355 / 1}{321,3} = 79,26 \text{ mm}^2$$

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife nach [EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2]

Da beide Gurte und Lippen voll wirksam sind, ist keine Optimierung/Iteration der Ergebnisse aus Schritt 1 und Schritt 2 notwendig!

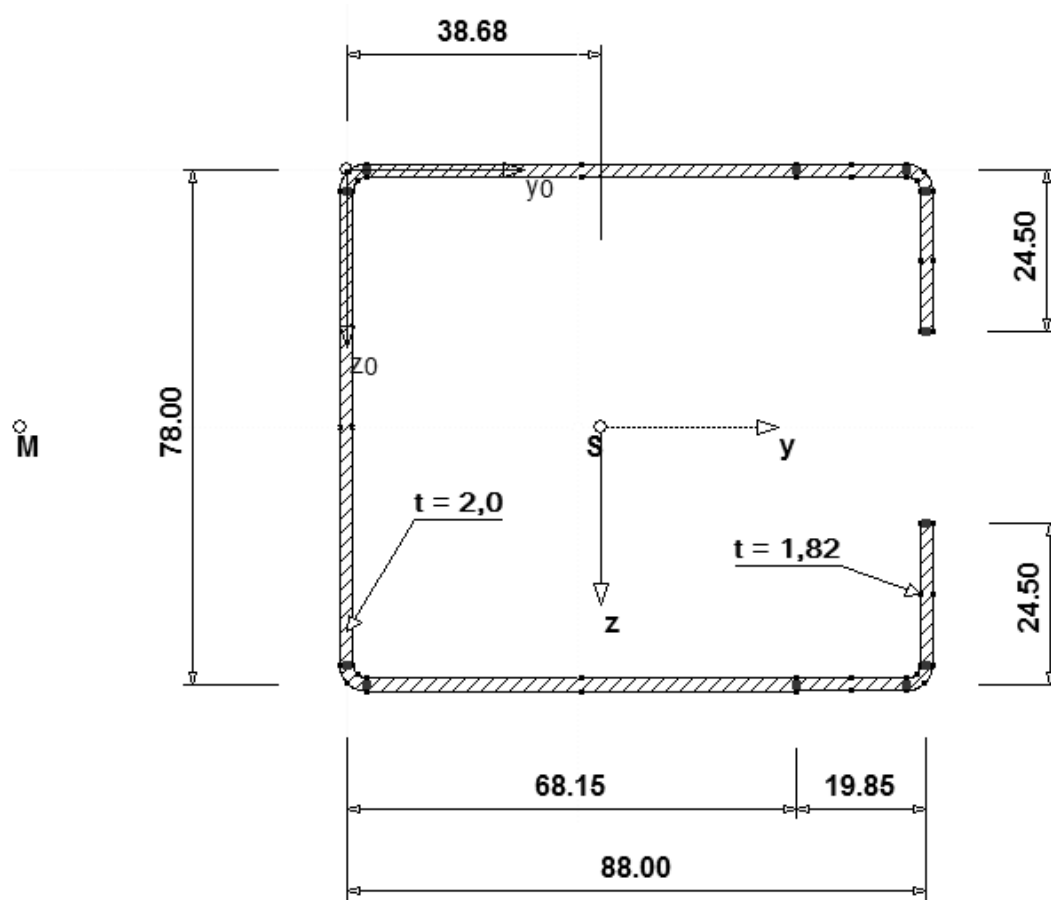
Querschnittswerte der reduzierten wirksamen Randsteife

Gurt: $b_{e1,web,c} = 68,15 \text{ mm}$ $b_{e2,lip,c} = 19,85 \text{ mm}$

Steg: $h_{e1,c} = h_{e2,c} = 39,00 \text{ mm}$

Lippe: $c_{eff,c} = 24,50 \text{ mm}$

Randsteife: $t_{red} = t \cdot \frac{A_{s,red}}{A_s} = 2 \cdot \frac{79,26}{86,12} = 1,84 \text{ mm}$

Wirksamer Querschnitt unter reiner Biegebeanspruchung um die z-z-Achse

Tab.4.4: Effektive Querschnittswerte unter Biegebeanspruchung:

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Fläche	A_{eff}	582	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung	$Y_{s,\text{eff}}$	38,68	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	$I_{\text{eff},y}$	65,84	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	$I_{\text{eff},z}$	66,00	cm ⁴
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 50,24mm)	$W_{\text{eff},z,\text{lip}}$	13,14	cm ³
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 39,68mm)	$W_{\text{eff},z,\text{web}}$	16,63	cm ³

4.2.1.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.1]

Aufgrund der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirksamen Querschnitt ergibt sich eine Querschnittsbeanspruchung aus Druck und einaxialer Biegung um die z-z-Achse.

Der wirksame Querschnitt unter Druck- und Biegebeanspruchung um die z-z-Achse sollte folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} \leq 1 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 6.25})$$

Beanspruchbarkeit für reinen Druck (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.3):

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{Mo}} = 475 \cdot 355 = 168625 N = 168,63 kN \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 6.2})$$

Zusatzmoment (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.9(2)):

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 2,94 mm$$

Biegebeanspruchbarkeit um die z-z-Achse (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.4):

$$M_{cz,Rd,com} = W_{z,eff,com} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{M0}} = 13,14 \cdot \frac{35,5}{1,0} = 466,47 kNcm$$

Wirksame Querschnittstragfähigkeit:

$$\frac{N_{Ed}}{168,63} + \frac{N_{Ed} \cdot 2,94 \cdot 10^{-1}}{466,47} \leq 1 \quad \rightarrow \quad N_{Ed} = 152,43 kN$$

4.2.1.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität [EN 1993-1-3, Abs. 6.2]

a) Beanspruchbarkeit des Druckstabes [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2 + 6.2.3]

→ Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] ist die Beanspruchbarkeit eines Bauteils mit dem wirksamen Querschnitt für die Versagensformen Biegeknicken, Drillknicken und Biegedrillknicken zu ermitteln. Die kleinste Beanspruchbarkeit ist dabei die maßgebende Grenztragfähigkeit des Bauteils.

Biegeknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2):

→ Da $I_z > I_y$ ist die Biegeknickbeanspruchbarkeit um die y-y-Achse maßgebend!

Bezugsschlankheitsgrad: $\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot 0,814 = 76,43$
(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.3)

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{L_{cr} \cdot \sqrt{A_{eff} / A}}{i_y \cdot \lambda_1} = \frac{1500 \cdot \sqrt{475 / 596}}{33,6 \cdot 76,43} = 0,521$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.51))

Imperfektionsbeiwert: Knicklinie „b“ nach [EN 1993-1-3, Tab. 6.3]
→ $\alpha = 0,34$ (EN 1993-1-1, Tab. 6.1)

Beiwert: $\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right]$
 $\phi = 0,5 \left[1 + 0,34(0,521 - 0,2) + 0,521^2 \right] = 0,690$
(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Abminderungsfaktor für Biegeknicken:

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_y^2}}$$

$$\chi_y = \frac{1}{0,690 + \sqrt{0,690^2 - 0,521^2}} = 0,875$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegeknicken des wirksamen Querschnitts um die maßgebende Achse unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_y \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,875 \cdot 475 \cdot 355}{1,0} = 147547 N = 147,5 kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

Biegedrillknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3):

Bei Bauteilen mit einfach symmetrischem Querschnitt muss berücksichtigt werden, dass die Tragfähigkeit infolge Drillknickens oder Biegedrillknickens geringer sein kann, als beim Biegeknicken.

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 68,74}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 633,21 kN$$

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die y-y-Achse:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 67,34}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 620,31 kN$$

Kritische Verzweigungslast Drillknicken:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(G \cdot I_T + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_T^2} \right) \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. (6.33a)})$$

$$\rightarrow \text{dabei ist: } i_0^2 = i_z^2 + i_y^2 + y_0^2 + z_0^2 = 34,0^2 + 33,6^2 + 90,5^2 = 10475$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.33b))

$$N_{cr,T} = \frac{1}{10475 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(8076,9 \cdot 0,080 + \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1606,2}{1500^2 \cdot 10^{-2}} \right) = 147,42 kN$$

Kritische Verzweigungslast Biegedrillknicken:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2 \cdot \beta} \cdot \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right]$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.35))

$$\rightarrow \text{mit: } \beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 = 1 - \frac{90,5^2}{10475} = 0,218$$

$$N_{cr,TF} = \frac{620,31}{2 \cdot 0,218} \cdot \left[1 + \frac{147,42}{620,31} - \sqrt{\left(1 - \frac{147,42}{620,31} \right)^2 + 4 \cdot \frac{90,5^2}{10475} \cdot \frac{147,42}{620,31}} \right] = 123,51 \text{ kN}$$

$$N_{cr,TF} = 123,51 \text{ kN} \leq N_{cr,T} = 147,42 \text{ kN}$$

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken:

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{N_{cr,TF}}} = \sqrt{\frac{475 \cdot 355}{123,51 \cdot 10^3}} = 1,168 \geq 0,2$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.53))

Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] und [EN 1993-1-3, Tab. 6.3] wird als Abminderungskurve zur Berücksichtigung des Biegedrillknickens von C- Profilen die europäische Knickspannungslinie „b“ verwendet.

$$\text{Imperfektionsbeiwert: } \alpha = 0,34$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwert: } \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right] \\ \phi &= 0,5 \left[1 + 0,34 \cdot (1,168 - 0,2) + 1,168^2 \right] = 1,347 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken:

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{TF}^2}}$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{1,347 + \sqrt{1,347^2 - 1,168^2}} = 0,496$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegedrillknicken des wirksamen Querschnitts unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_{TF} \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,496 \cdot 475 \cdot 355}{1,0} = 83638N = 83,64kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

→ Die minimale Beanspruchbarkeit des Druckstabes ergibt sich durch das globale Stabilitätsproblem Biegedrillknicken.

$$\mathbf{N_{b,Rd} = 83,64kN}$$

b) Biegedrillknickbeanspruchbarkeit (Momententragfähigkeit) des Biegeträgers

Die Biegedrillknickbeanspruchbarkeit von Biegeträgern der QK 4 sollte mit der europ. Knickspannungslinie „b“ bestimmt werden [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.4].

Ideal- kritisches Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken nach [DIN 4114]:

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_T^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{I_w}{I_y} + \frac{L_T^2 \cdot G \cdot I_T}{\pi^2 \cdot E \cdot I_y} + \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right)^2} - \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 67,34}{150^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{1606,2}{67,34} + \frac{150^2 \cdot 8076,9 \cdot 0,080}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 67,34} + \left(\frac{-0,97}{3} - 9,05\right)^2} - \left(\frac{-0,97}{3} - 9,05\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = 12520 \text{ kNcm}$$

Bezogener Biegedrillknickschlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{eff,z,tip} \cdot f_{yb}}{M_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{13,14 \cdot 35,5}{12520}} = 0,193 < 0,2 \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$\rightarrow \chi_{TF} = 1,0$$

Biegedrillknickbeanspruchbarkeit:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot w_z \cdot f_{yb} / \gamma_{M1} \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$M_{b,Rd} = 1,0 \cdot 13,14 \cdot 35,5 / 1,0 = 466,47 \text{ kNcm}$$

→ Die maximale Biegebeanspruchbarkeit bei Biegung um die z-z-Achse beträgt:

$$\mathbf{M_{b,Rd} = 466,47 \text{ kNcm}}$$

c) Grenztragfähigkeit des Querschnitts unter Druck- und Biegebeanspruchung (Interaktionsnachweis) nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5]

Bemessungswert der Normalkraftbeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(a)):

$$N_{b,Rd} = 83,64 \text{ kN}$$

Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(b)):

$$M_{b,Rd} = 466,47 \text{ kNm}$$

Zusatzmoment aus Schwerpunktverschiebung von A zu A_{eff}:

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 2,94 \text{ mm}$$

Interaktionsnachweis für Biegung und zentrische Druckkraft:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1,0 \quad (\text{EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5})$$

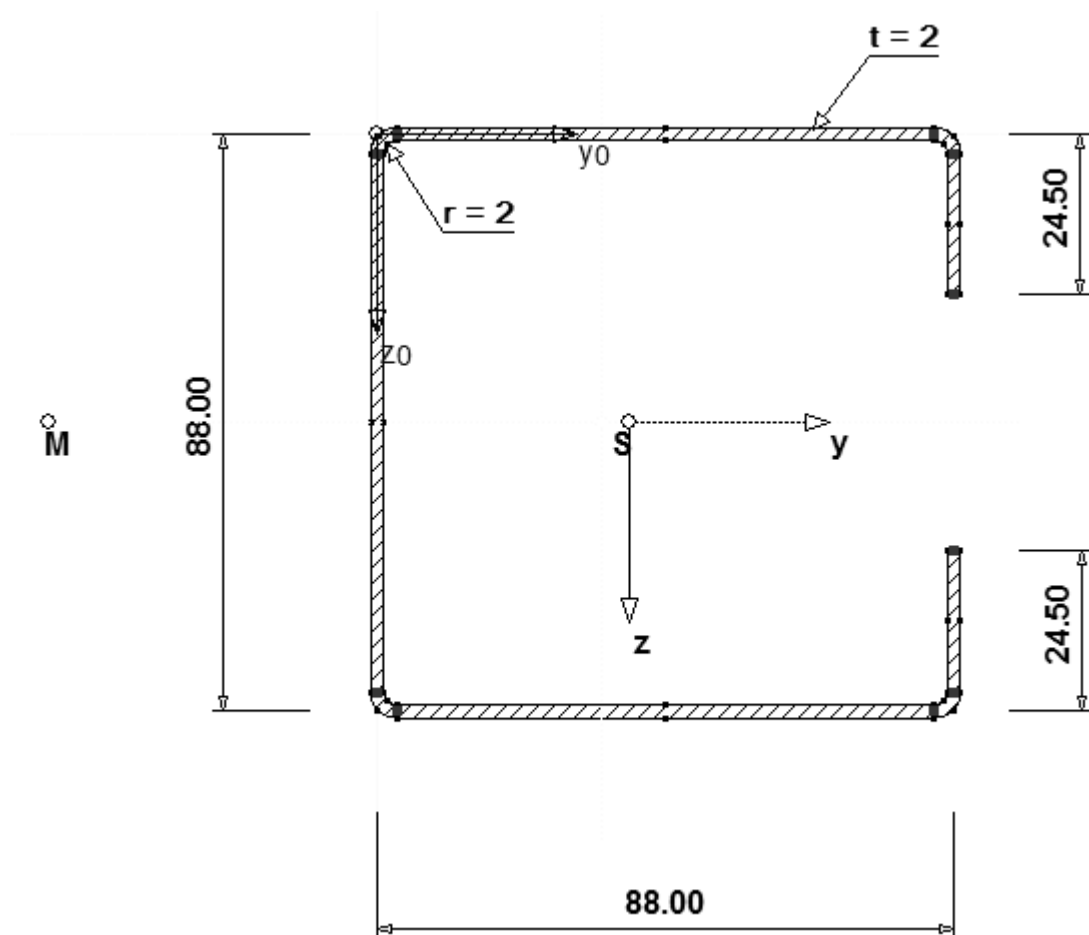
$$\left(\frac{N_{Ed}}{83,64} \right)^{0,8} + \left(\frac{N_{Ed} \cdot 0,294}{466,47} \right)^{0,8} \leq 1,0$$

$$\rightarrow \quad N_{Ed} = 74,67 \text{ kN}$$

Das Grenzzustand der Tragfähigkeit für das Profil C80/90/2 unter reiner Druckbeanspruchung ist bei einer Normalkraft von 74,67 kN erreicht.

4.2.2 Querschnitt C 90x90x2

→ Die Bemaßung bezieht sich auf die Querschnittsmittellinien.



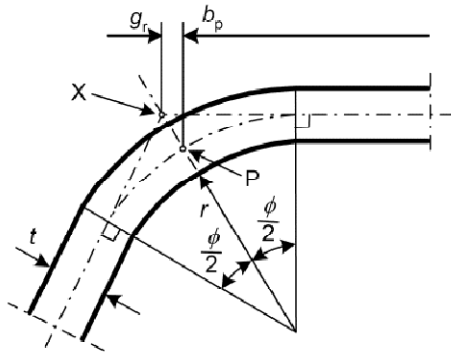
4.2.2.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung

Tab.4.5: Querschnittswerte C90/90/2

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Profilhöhe	h	90,00	mm
Profilbreite	b	90,00	mm
Blechdicke	t	2,00	mm
Lippenlänge	c	24,50	mm
Biegeradius (innen)	r	2,00	mm
Fläche	A	616	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung vom Steg	y_s	38,4	mm
Schwerpunktabstand in y-Richtung Von der Lippe	y_s'	49,6	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	I_y	87,82	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	I_z	71,80	cm ⁴
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 50,6mm)	$W_{z, lip}$	14,20	cm ³
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 39,4mm)	$W_{z, web}$	18,21	cm ³
Trägheitsradius	i_z	34,2	mm
Trägheitsradius	i_y	37,8	mm
Abstand Schubmittelpunkt von Schwerpunkt	y_0	88,5	mm
Torsionsträgheitsmoment	I_T	0,080	cm ⁴
Wölbwiderstand	$I_{<\omega>}$	1905,15	cm ⁶
Querschnittsstrecke	r_z	-13,8	mm

Querschnittsidealisierung:

Einfluss der Eckausrundung nach [EN 1993-1-1, Abs. 5.1]:



$$r_m = r + t / 2 = 2 + 1 = 3 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m \cdot (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 0,88 \text{ mm}$$

$$u = \frac{\pi}{2} \cdot r_m = \frac{\pi}{2} \cdot 3 = 4,71 \text{ mm}$$

$$x_m = 0,638 \cdot r_m = 0,638 \cdot 3 = 1,91 \text{ mm}$$

$$I_{y,RC} = I_{z,RC} = \frac{t \cdot r_m^3}{12} = \frac{2 \cdot 3^3}{12} = 4,5 \text{ mm}^4$$

Für die weitere Berechnung sind außerdem folgende Querschnittsabmessungen bezogen auf die Querschnittsmittellinien von Bedeutung:

Nennwert der geraden Höhe: $h_w = h - 2 g_r = 88 - 2 \cdot 0,88 = 86,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Breite: $b_p = b - 2 \cdot g_r = 88 - 2 \cdot 0,88 = 86,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Lippenlänge: $b_{p,c} = b_{bc,c} - g_r = 24,5 - 0,88 = 23,62 \text{ mm}$

4.2.2.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben

- *Teilsicherheitsbeiwert für das Material:*

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$$

→ laut nationaler Empfehlung ist für Deutschland $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$.
Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird aber nach allg. gültigem Eurocode, d.h. ohne nationale Empfehlung, mit $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ gerechnet!

- *Blechdicken und deren Toleranzen:*

Für Bleche und Träger gilt: $0,45\text{mm} \leq t_{\text{cor}} \leq 15\text{mm}$

$$t_{\text{vorh}} = t_{\text{cor}} = 2\text{mm}$$

→ Bedingung erfüllt!

- *Einfluss der Eckausrundungen:*

$$r/t = 3/2 = 1,5 \leq 5$$

$$r/\min(b_p, h_w) = 3/88 = 0,034 \leq 0,1$$

→ Der Einfluss der Eckausrundung darf vernachlässigt werden. Für die Berechnung der Bauteilsteifigkeit werden die Eckausrundungen aber immer berücksichtigt!

- *Geometrische Verhältnisse:*

$$b/t = 90/2 = 45 \leq 60$$

$$c/t = 25,5/2 = 12,75 \leq 50$$

$$h/t = 90/2 = 45 \leq 500$$

→ Bedingungen erfüllt!

- Zum Erlangen ausreichend hoher Steifigkeit und zur Vermeidung von vorzeitigen Versagen der Steifen sollten deren Abmessungen innerhalb folgender Grenze liegen:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6$$

$$c/b = 25,5/90 = 0,283$$

→ Bedingung erfüllt! Die Lippen können bei der Berechnung berücksichtigt werden.

- *Bedingungen für ebene Platten mit Randsteifen*

Der Winkel zwischen Steife und Blech beträgt 90° und befindet sich somit innerhalb der Grenzen von 45° - 135°

→ Die Berechnungsmethode für Randsteifen darf angewendet werden.

4.2.2.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung

- Spannungsverteilung infolge reinem Druck:

→ Die Spannung verteilt sich unter reiner Druckbeanspruchung gleichmäßig über den gesamten Querschnitt

Spannungsverhältnis: $\psi = 1$

Druckspannung: $\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges (einseitig gestützte Platte):

→ Steg: 4-seitig gelagerte Platte

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulslankheit: $\bar{\lambda}_p = \frac{h_w / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 0,933 \geq 0,673$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,933 - 0,055 \cdot 4}{0,933^2} = 0,819 \leq 1,0$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Steghöhe: $h_{eff} = \rho \cdot h_w = 0,819 \cdot 86,24 = 70,63 \text{ mm}$

$$h_{e1} = h_{e2} = 0,5 \cdot h_{eff} = 0,5 \cdot 70,63 = 35,32 \text{ mm}$$

$$h_{e1,c} = h_{e2,c} = 0,5 \cdot h_{eff} + g_r = 35,32 + 0,88 = 36,20 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

- Wirksame Fläche der gedrückten Gurte mit Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulschlankheit:
$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 0,933 \geq 0,673$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor:
$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2} = \frac{0,933 - 0,055 \cdot 4}{0,933^2} = 0,819 \leq 1,0$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten: $b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0,819 \cdot 86,24 = 70,63mm$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 70,63 = 35,32mm$$

$$b_{e1,c} = b_{e2,c} = 0,5 \cdot b_{eff} + g_r = 35,32 + 0,88 = 36,20mm$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Randsteife (einseitig gestützte Platte)

Allgemeine Randbedingung:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert: Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulschlankheit:
$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:
$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} = 1,0 \cdot 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche:

$$A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$$

$$A_s = (36,20 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 118,82 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82} \right)$$

$$e_s = 5,062 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(36,20 - 3) \cdot 2 \cdot ((36,20 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 11,04 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 11,04 = 76,96 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$\begin{aligned}
 I_s &= 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3 \\
 &\quad + (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2 \\
 I_s &= 1/12 \cdot (36,20 - 3) \cdot 2^3 + (36,20 - 3) \cdot 2 \cdot 5,062^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3 \\
 &\quad + (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 5,062 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 5,062)^2 \\
 I_s &= 6778,8 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3; Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 76,96 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} \\
 K &= \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{76,96^2 \cdot 88 + 76,96^3 + 0,5 \cdot 76,96^2 \cdot 88 \cdot 1} \\
 K &= 0,373 \text{ N/mm}^2
 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,373 \cdot 210000 \cdot 6778,8}}{118,82} = 387,87 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{387,87}} = 0,957 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,957 = 0,778$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

Reduzierte wirksame Steifenfläche unter Berücksichtigung des Knickens der Randsteife:

$$A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}}$$

$$A_{S,red} = 0,778 \cdot 118,82 \cdot 1,0 = 92,44 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.17)

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

→ Wiederholung von **Schritt 1** mit den wirksamen Breiten der Randsteife infolge Forminstabilität unter Berücksichtigung der reduzierten Tragspannung

Reduzierter Schlankheitsgrad der Randsteife:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\chi_d} \quad (\text{EN 1993-1-3; Gl. 5.16})$$

→ Nachfolgend wird **Schritt 2** wiederholt, um den korrigierten Abminderungsfaktor für die Steife zu ermitteln, so lange bis gilt:

$$\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)} \rightarrow \text{jedoch: } \chi_{d,n} < \chi_{d(n-1)}$$

Es kann keine generelle Aussage getroffen werden, wie viele Iterationen durchzuführen sind. In diesem Fall sind 2 Iterationen ausreichend, um die Bedingung $\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)}$ zu erfüllen. Die Ergebnisse der Iterationen sind mit allen wichtigen Zwischenwerten in Tab. Xx zusammengefasst.

Tab.4.6: Iterationen zur Berechnung der reduzierten wirksamen Fläche der Randsteife

Parameter			Einheit	Ausgangswert	1. Iteration	2. Iteration
Ransteife	Abminderungs-faktor	$\chi_{d(n-1)}$	o.E.	1,000	0,778	0,772
Gurt Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 4$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,933	0,933	0,933
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,823	0,820
	Abminderungs-faktor	ρ	o.E.	0,819	0,890	0,892
	Wirksame Breite	$b_{e2,c}$	mm	36,20	39,26	39,34
Lippe Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 0,5$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,722	0,722	0,722
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,637	0,634
	Abminderungs-Faktor	ρ	o.E.	1,000	1,000	1,000
	Wirksame Breite	$c_{eff,c}$	mm	24,50	24,50	24,50
Randsteife	Wirksame Fläche	A_s	mm ²	118,82	124,94	125,1
	Abstand	e'_s	mm	5,062	4,814	4,808
		b_1	mm	76,96	75,65	75,62
	Trägheitsmoment	I_s	mm ⁴	6778,8	6930,0	6933,7
	Federsteifigkeit	K	N/mm ²	0,373	0,388	0,389
	Verzweigungs-Spannung	$\sigma_{cr,s}$	N/mm ²	387,87	380,38	380,49
	Abminderungs-Faktor	$\chi_{d,n}$	o.E.	0,778	0,772	0,772
	Reduzierte Wirksame Fläche	$A_{s,red}$	mm ²	92,44	96,45	96,58

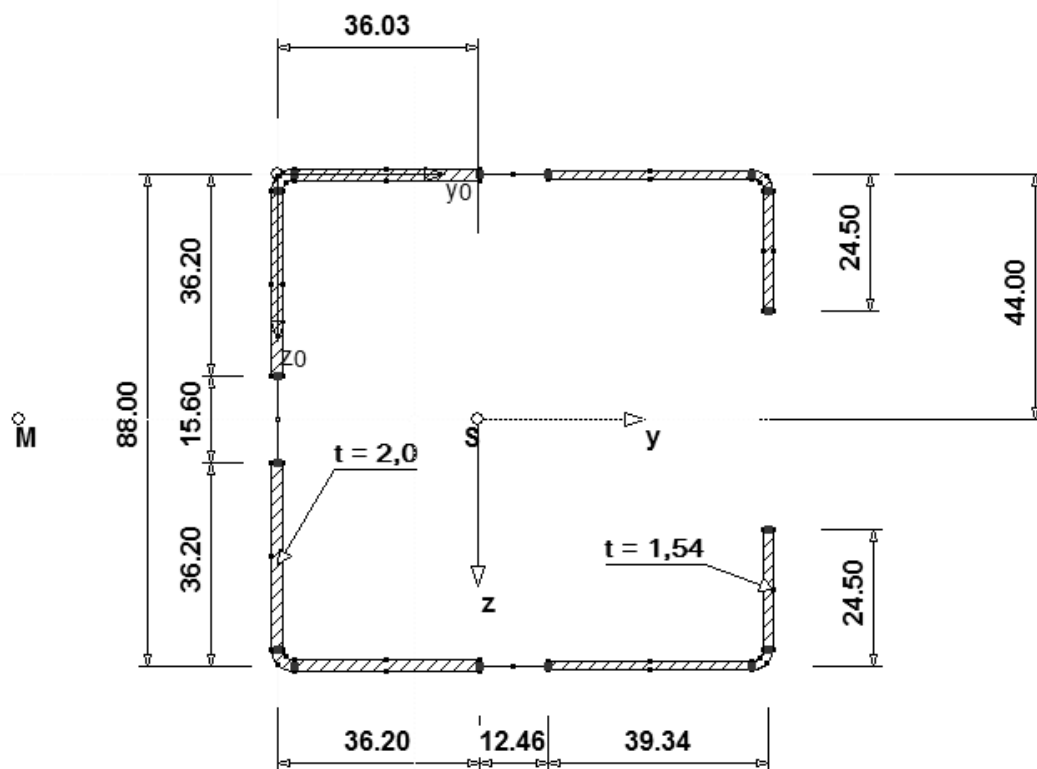
Querschnittswerte der reduzierten wirksamen Randsteife (Ergebnis der Iteration)

Gurt: $b_{e1,c} = 36,20\text{mm}$ $b_{e2,c} = 39,34\text{mm}$

Steg: $h_{e1,c} = h_{e2,c} = 36,20\text{mm}$

Lippe: $c_{eff,c} = 24,50\text{mm}$

Randsteife: $t_{red} = t \cdot \frac{A_{s,red}}{A_s} = \chi \cdot t = 0,772 \cdot 2 = 1,54\text{mm}$



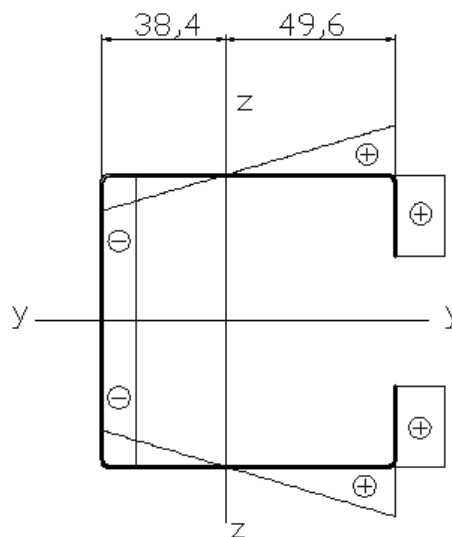
Tab.4.7: Effektive Querschnittswerte unter Druckbeanspruchung

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Fläche	A_{eff}	477	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung	$Y_{s,eff}$	36,03	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	$I_{eff,y}$	69,00	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	$I_{eff,z}$	57,85	mm
Schwerpunktverschiebung in y- Richtung $e_{N,Y} = y_s - y_{s,eff} = 38,4\text{mm} - 36,03\text{mm}$	$e_{N,Y}$	2,37	mm

4.2.2.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse

Während der Bruttoquerschnitt einer reinen Druckbeanspruchung unterliegt, wird der wirksame Querschnitt nun durch Druck- und gleichzeitige Biegebeanspruchung um die z-z-Achse belastet. Dies resultiert aus der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirksamen Querschnitt in Richtung der y-y-Achse, die aufgrund der nunmehr exzentrischen Normalkraft am wirksamen Querschnitt eine zusätzliche Biegebeanspruchung M_z hervorruft. Somit muss folgend die Biegetragfähigkeit des dünnwandigen Querschnitts bestimmt werden.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse (Druck positiv):



Spannungsverhältnis:
$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-(b_t - g_r)}{b_c - g_r}$$

$$\psi = \frac{-(38,4 - 0,88)}{49,6 - 0,88} = -0,770$$

Druckspannung:
$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges:

Steg ist zugbeansprucht → Steg ist voll wirksam

- Wirksame Fläche der Gurte mit gedrückter Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert:

$$k_{\sigma} = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,770) + 9,78 \cdot (-0,770)^2$$

$$k_{\sigma} = 18,45 \quad (\text{EN 1993-1-5, Tab. 4.1})$$

Beulschlankheit:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{18,45}} = 0,434 \leq 0,857$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0$ (EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p / (1 - \psi) = 1,0 \cdot 86,24 / (1 - (-0,770)) = 48,72 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 48,72 = 19,49 \text{ mm}$$

$$b_{e1,c} = b_{e1} + g_r = 19,49 + 0,88 = 20,37 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 48,72 = 29,23 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Bezeichnung nach EN 1993-1-3:

$$b_{e1,web,c} = b_t + b_{e2} = 38,4 + 29,23 = 67,63 \text{ mm}$$

$$b_{e2,lip,c} = b_{e1,c} = 20,37 \text{ mm}$$

Randsteife (einseitig gestützte Platte)

Allgemeine Randbedingung:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert:

Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulschlankheit:

$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$c_{eff} = \rho * b_{p,c} = 1,0 * 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche: $A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$

$$A_s = (20,37 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 87,16 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{87,16} \right)$$

$$e_s = 6,901 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(20,37 - 3) \cdot 2 \cdot ((20,37 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{87,16}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 4,78 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 4,78 = 83,22 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$I_s = 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3$$

$$+ (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2$$

$$I_s = 1/12 \cdot (20,37 - 3) \cdot 2^3 + (20,37 - 3) \cdot 2 \cdot 6,901^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3$$

$$+ (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 6,901 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 6,901)^2$$

$$I_s = 5662,1 \text{ mm}^4$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 83,22 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f}$$

$$K = \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{83,22^2 \cdot 88,0 + 83,22^3 + 0,5 \cdot 83,22^2 \cdot 88,0 \cdot 1}$$

$$K = 0,310 \text{ N / mm}^2$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,310 \cdot 210000 \cdot 5662,1}}{87,16} = 440,55 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Seitenfläche unter Berücksichtigung des Knickens der
Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{440,55}} = 0,898 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \overline{\lambda}_d$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,898 = 0,821$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife:

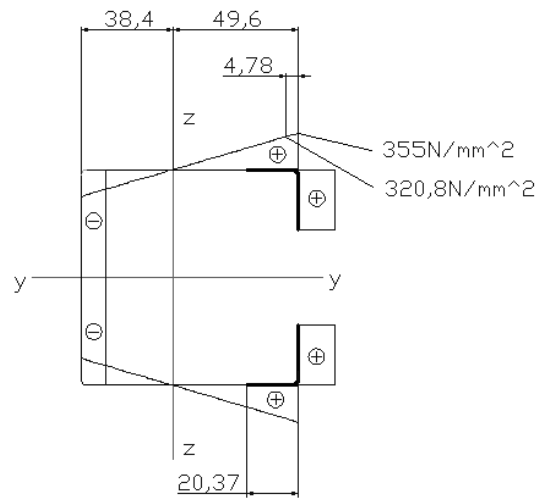
$$A_{s,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}}$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.17)

→ Dabei ist $\sigma_{com,ED}$ die am wirksamen Querschnitt ermittelte

Druckspannung in der Schwerlinie der Steife.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse:



$$\sigma_{com,ED} = \frac{355 \cdot (49,6 - 4,78)}{49,6} = 320,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}} = 0,821 \cdot 87,16 \cdot \frac{355 / 1}{320,8} = 79,19 \text{ mm}^2$$

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife nach [EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2]

Da beide Gurte und Lippen voll wirksam sind, ist keine Optimierung/Iteration der Ergebnisse aus Schritt 1 und Schritt 2 notwendig!

Querschnittswerte der reduzierten wirksamen Randsteife

Gurt: $b_{e1,web,c} = 67,63 \text{ mm}$ $b_{e2,lip,c} = 20,37 \text{ mm}$

Steg: $h_{e1,c} = h_{e2,c} = 44,00 \text{ mm}$

Lippe: $c_{eff,c} = 24,50 \text{ mm}$

Randsteife: $t_{red} = t \cdot \frac{A_{s,red}}{A_s} = 2 \cdot \frac{79,19}{87,16} = 1,82 \text{ mm}$

4.2.2.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.1]

Aufgrund der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirkamen Querschnitt ergibt sich eine Querschnittsbeanspruchung aus Druck und einaxialer Biegung um die z-z-Achse.

Der wirksame Querschnitt unter Druck- und Biegebeanspruchung um die z-z-Achse sollte folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} \leq 1 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 6.25})$$

Beanspruchbarkeit für reinen Druck (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.3):

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{Mo}} = 477 \cdot 355 = 169355 N = 169,34 kN \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 6.2})$$

Zusatzmoment (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.9(2)):

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 2,37 mm$$

Biegebeanspruchbarkeit um die z-z-Achse (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.4):

$$M_{cz,Rd,com} = W_{z,eff,com} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{M0}} = 13,26 \cdot \frac{35,5}{1,0} = 470,73 kNcm$$

Wirksame Querschnittstragfähigkeit:

$$\frac{N_{Ed}}{169,34} + \frac{N_{Ed} \cdot 2,37 \cdot 10^{-1}}{470,73} \leq 1 \quad \rightarrow \quad N_{Ed} = 156,04 kN$$

4.2.2.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität [EN 1993-1-3, Abs. 6.2]

a) Beanspruchbarkeit des Druckstabes [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2 + 6.2.3]

→ Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] ist die Beanspruchbarkeit eines Bauteils mit dem wirksamen Querschnitt für die Versagensformen Biegeknicken, Drillknicken und Biegedrillknicken zu ermitteln. Die kleinste Beanspruchbarkeit ist dabei die maßgebende Grenztragfähigkeit des Bauteils.

Biegeknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2):

→ Da $I_z < I_y$ ist die Biegeknickbeanspruchbarkeit um die z-z-Achse maßgebend!

Bezugsschlankheitsgrad: $\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot 0,814 = 76,43$
(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.3)

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr} \cdot \sqrt{A_{eff} / A}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{1500 \cdot \sqrt{477 / 616}}{34,2 \cdot 76,43} = 0,505 \quad (\text{EN 1993-1-1, Gl. (6.51)})$$

Imperfektionsbeiwert: Knicklinie „b“ nach [EN 1993-1-3, Tab. 6.3]

$$\rightarrow \alpha = 0,34 \quad (\text{EN 1993-1-1, Tab. 6.1})$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwert: } \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] \\ \phi &= 0,5 \left[1 + 0,34(0,505 - 0,2) + 0,505^2 \right] = 0,679 \\ &(\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2}) \end{aligned}$$

Abminderungsfaktor für Biegeknicken:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}}$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,679 + \sqrt{0,679^2 - 0,505^2}} = 0,883$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegeknicken des wirksamen Querschnitts um die maßgebende Achse unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,883 \cdot 477 \cdot 355}{1,0} = 149523 N = 149,52 kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

Biegedrillknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3):

Bei Bauteilen mit einfach symmetrischem Querschnitt muss berücksichtigt werden, dass die Tragfähigkeit infolge Drillknickens oder Biegedrillknickens geringer sein kann, als beim Biegeknicken.

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 71,80}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 661,40 kN$$

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die y-y-Achse:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 87,82}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 808,97 kN$$

Kritische Verzweigungslast Drillknicken:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(G \cdot I_T + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_T^2} \right) \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. (6.33a)})$$

$$\rightarrow \text{dabei ist: } i_0^2 = i_z^2 + i_y^2 + y_0^2 + z_0^2 = 34,2^2 + 37,8^2 + 88,5^2 = 10431$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.33b))

$$N_{cr,T} = \frac{1}{10431 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(8076,9 \cdot 0,080 + \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 1905,15}{1500^2 \cdot 10^{-2}} \right) = 174,44 kN$$

Kritische Verzweigungslast Biegedrillknicken:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2 \cdot \beta} \cdot \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right]$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.35))

$$\rightarrow \text{mit: } \beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 = 1 - \frac{88,5^2}{10431} = 0,249$$

$$N_{cr,TF} = \frac{808,97}{2 \cdot 0,249} \cdot \left[1 + \frac{174,44}{808,97} - \sqrt{\left(1 - \frac{174,44}{808,97}\right)^2 + 4 \cdot \frac{88,5^2}{10431} \cdot \frac{174,44}{808,97}} \right] = 148,34 \text{ kN}$$

$$N_{cr,TF} = 148,34 \text{ kN} \leq N_{cr,T} = 174,44 \text{ kN}$$

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken:

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{N_{cr,TF}}} = \sqrt{\frac{477 \cdot 355}{148,34 \cdot 10^3}} = 1,068 \geq 0,2 \quad (\text{EN 1993-1-1, Gl. (6.53)})$$

Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] und [EN 1993-1-3, Tab. 6.3] wird als Abminderungskurve zur Berücksichtigung des Biegedrillknickens von C- Profilen die europäische Knickspannungslinie „b“ verwendet.

$$\text{Imperfektionsbeiwert: } \alpha = 0,34$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwert: } \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right] \\ \phi &= 0,5 \left[1 + 0,34 \cdot (1,068 - 0,2) + 1,068^2 \right] = 1,218 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken:

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{TF}^2}}$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{1,218 + \sqrt{1,218^2 - 1,068^2}} = 0,554$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegedrillknicken des wirksamen Querschnitts unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_{TF} \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,554 \cdot 477 \cdot 355}{1,0} = 93811N = 93,81kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

→ Die minimale Beanspruchbarkeit des Druckstabes ergibt sich durch das globale Stabilitätsproblem Biegedrillknicken.

$$\mathbf{N_{b,Rd} = 93,81kN}$$

b) Biegedrillknickbeanspruchbarkeit (Momententragfähigkeit) des Biegeträgers

Die Biegedrillknickbeanspruchbarkeit von Biegeträgern der QK 4 sollte mit der europ. Knickspannungslinie „b“ bestimmt werden [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.4].

Ideal- kritisches Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken nach [DIN 4114]:

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_T^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{I_w}{I_y} + \frac{L_T^2 \cdot G \cdot I_T}{\pi^2 \cdot E \cdot I_y} + \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right)^2} - \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 87,82}{150^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{1905,15}{87,82} + \frac{150^2 \cdot 8076,9 \cdot 0,080}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 87,82} + \left(\frac{-1,38}{3} - 8,85\right)^2} - \left(\frac{-1,38}{3} - 8,85\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = 15984 \text{ kNcm}$$

Bezogener Biegedrillknickschlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{eff,z,tip} \cdot f_{yb}}{M_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{13,26 \cdot 35,5}{15984}} = 0,172 < 0,2 \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$\rightarrow \chi_{TF} = 1,0$$

Biegedrillknickbeanspruchbarkeit:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot w_z \cdot f_{yb} / \gamma_{M1} \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$M_{b,Rd} = 1,0 \cdot 13,26 \cdot 35,5 / 1,0 = 470,73 \text{ kNcm}$$

→ Die maximale Biegebeanspruchbarkeit bei Biegung um die z-z-Achse beträgt:

$$\mathbf{M_{b,Rd} = 470,73 \text{ kNcm}}$$

c) Grenztragfähigkeit des Querschnitts unter Druck- und Biegebeanspruchung (Interaktionsnachweis) nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5]

Bemessungswert der Normalkraftbeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(a)):

$$N_{b,Rd} = 93,81 \text{ kN}$$

Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(b)):

$$M_{b,Rd} = 470,73 \text{ kNm}$$

Zusatzmoment aus Schwerpunktverschiebung von A zu A_{eff}:

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 2,37 \text{ mm}$$

Interaktionsnachweis für Biegung und zentrische Druckkraft:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1,0 \quad (\text{EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5})$$

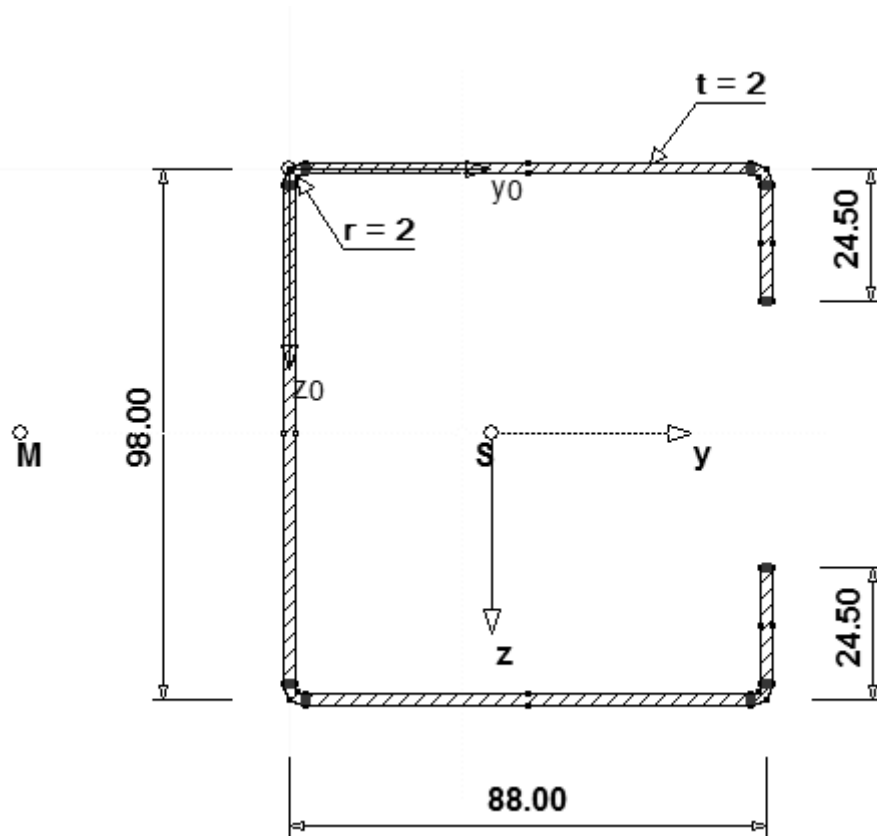
$$\left(\frac{N_{Ed}}{93,81} \right)^{0,8} + \left(\frac{N_{Ed} \cdot 0,237}{470,73} \right)^{0,8} \leq 1,0$$

$$\rightarrow \quad N_{Ed} = 84,52 \text{ kN}$$

Das Grenzzustand der Tragfähigkeit für das Profil C90/90/2 unter reiner Druckbeanspruchung ist bei einer Normalkraft von 84,52 kN erreicht.

4.2.3 Querschnitt C 100x90x2

→ Bemaßung bezieht sich auf die Querschnittsmittellinien



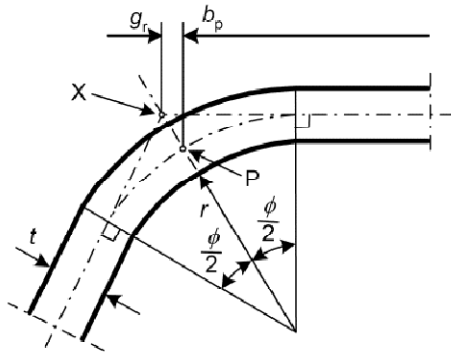
4.2.3.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung

Tab.4.9: Querschnittswerte C100/90/2

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Profilhöhe (Außenkante)	h	100,00	mm
Profilbreite (Außenkante)	b	90,00	mm
Blechdicke	t	2,00	mm
Lippenlänge	c	24,50	mm
Biegeradius (innen)	r	2,00	mm
Fläche	A	636	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung vom Steg	y_s	37,22	mm
Schwerpunktabstand in y-Richtung Von der Lippe	y_s'	50,78	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	I_y	111,39	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	I_z	74,66	cm ⁴
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 51,78mm)	$W_{z, lip}$	14,42	cm ³
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 38,22mm)	$W_{z, web}$	19,54	cm ³
Trägheitsradius	i_z	34,3	mm
Trägheitsradius	i_y	41,9	mm
Abstand Schubmittelpunkt von Schwerpunkt	y_0	86,56	mm
Torsionsträgheitsmoment	I_T	0,080	cm ⁴
Wölbwiderstand	$I_{<\omega>}$	2243,28	cm ⁶
Querschnittsstrecke	r_z	-18,4	mm

Querschnittsidealisierung:

Einfluss der Eckausrundung nach [EN 1993-1-1, Abs. 5.1]:



$$r_m = r + t / 2 = 2 + 1 = 3 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m \cdot (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 0,88 \text{ mm}$$

$$u = \frac{\pi}{2} \cdot r_m = \frac{\pi}{2} \cdot 3 = 4,71 \text{ mm}$$

$$x_m = 0,638 \cdot r_m = 0,638 \cdot 3 = 1,91 \text{ mm}$$

$$I_{y,RC} = I_{z,RC} = \frac{t \cdot r_m^3}{12} = \frac{2 \cdot 3^3}{12} = 4,5 \text{ mm}^4$$

Für die weitere Berechnung sind außerdem folgende Querschnittsabmessungen bezogen auf die Querschnittsmittellinien von Bedeutung:

Nennwert der geraden Höhe: $h_w = h - 2 g_r = 98 - 2 \cdot 0,88 = 96,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Breite: $b_p = b - 2 \cdot g_r = 88 - 2 \cdot 0,88 = 86,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Lippenlänge: $b_{p,c} = b_{bc,c} - g_r = 24,5 - 0,88 = 23,62 \text{ mm}$

4.2.3.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben

- *Teilsicherheitsbeiwert für das Material:*

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$$

→ laut nationaler Empfehlung ist für Deutschland $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$.
Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird aber nach allg. gültigem Eurocode, d.h. ohne nationale Empfehlung, mit $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ gerechnet!

- *Blechedicken und deren Toleranzen:*

Für Bleche und Träger gilt: $0,45\text{mm} \leq t_{\text{cor}} \leq 15\text{mm}$

$$t_{\text{vorh}} = t_{\text{cor}} = 2\text{mm}$$

→ Bedingung erfüllt!

- *Einfluss der Eckausrundungen:*

$$r/t = 3/2 = 1,5 \leq 5$$

$$r/\min(b_p, h_w) = 3/88 = 0,034 \leq 0,1$$

→ Der Einfluss der Eckausrundung darf vernachlässigt werden. Für die Berechnung der Bauteilsteifigkeit werden die Eckausrundungen aber immer berücksichtigt!

- *Geometrische Verhältnisse:*

$$b/t = 90/2 = 45 \leq 60$$

$$c/t = 25,5/2 = 12,75 \leq 50$$

$$h/t = 100/2 = 50 \leq 500$$

→ Bedingungen erfüllt!

- Zum Erlangen ausreichend hoher Steifigkeit und zur Vermeidung von vorzeitigen Versagen der Steifen sollten deren Abmessungen innerhalb folgender Grenze liegen:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6$$

$$c/b = 25,5/90 = 0,283$$

→ Bedingung erfüllt! Die Lippen können bei der Berechnung berücksichtigt werden.

- *Bedingungen für ebene Platten mit Randsteifen*

Der Winkel zwischen Steife und Blech beträgt 90° und befindet sich somit innerhalb der Grenzen von 45° - 135°

→ Die Berechnungsmethode für Randsteifen darf angewendet werden.

4.2.3.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung

- Spannungsverteilung infolge reinem Druck:

→ Die Spannung verteilt sich unter reiner Druckbeanspruchung gleichmäßig über den gesamten Querschnitt

Spannungsverhältnis: $\psi = 1$

Druckspannung: $\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges (einseitig gestützte Platte):

→ Steg: 4-seitig gelagerte Platte

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulslankheit: $\bar{\lambda}_p = \frac{h_w / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{96,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 1,041 \geq 0,673$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,041 - 0,055 \cdot 4}{1,041^2} = 0,758 \leq 1,0$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Steghöhe: $h_{eff} = \rho \cdot h_w = 0,758 \cdot 96,24 = 72,95 \text{ mm}$

$$h_{e1} = h_{e2} = 0,5 \cdot h_{eff} = 0,5 \cdot 72,95 = 36,47 \text{ mm}$$

$$h_{e1,c} = h_{e2,c} = 0,5 \cdot h_{eff} + g_r = 36,47 + 0,88 = 37,35 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

- Wirksame Fläche der gedrückten Gurte mit Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulschlankheit:
$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 0,933 \geq 0,673$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor:
$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2} = \frac{0,933 - 0,055 \cdot 4}{0,933^2} = 0,819 \leq 1,0$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:
$$b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0,819 \cdot 86,24 = 70,63mm$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 70,63 = 35,32mm$$

$$b_{e1,c} = b_{e2,c} = 0,5 \cdot b_{eff} + g_r = 35,32 + 0,88 = 36,20mm$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Randsteife (einseitig gestützte Platte)

Allgemeine Randbedingung:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert: Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulschlankheit:
$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:
$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} = 1,0 \cdot 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche:

$$A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$$

$$A_s = (36,20 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 118,82 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82} \right)$$

$$e_s = 5,062 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(36,20 - 3) \cdot 2 \cdot ((36,20 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 11,04 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 11,04 = 76,96 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$\begin{aligned}
 I_s &= 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3 \\
 &\quad + (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2 \\
 I_s &= 1/12 \cdot (36,20 - 3) \cdot 2^3 + (36,20 - 3) \cdot 2 \cdot 5,026^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3 \\
 &\quad + (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 5,026 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 5,026)^2
 \end{aligned}$$

$$I_s = 6778,8 \text{ mm}^4$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3; Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 76,96 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f}$$

$$K = \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{76,96^2 \cdot 98 + 76,96^3 + 0,5 \cdot 76,96^2 \cdot 98 \cdot 1}$$

$$K = 0,348 \text{ N / mm}^2$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,348 \cdot 210000 \cdot 6778,8}}{118,82} = 374,64 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{374,64}} = 0,973 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \overline{\lambda}_d$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,973 = 0,767$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

Reduzierte wirksame Steifenfläche unter Berücksichtigung des Knickens der Randsteife:

$$A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}}$$

$$A_{S,red} = 0,767 \cdot 118,82 \cdot 1,0 = 91,13 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.17)

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

→ Wiederholung von **Schritt 1** mit den wirksamen Breiten der Randsteife infolge Forminstabilität unter Berücksichtigung der reduzierten

Tragspannung $\sigma_{cam,ED,i} = \chi_d \cdot f_{y,b} / \gamma_{M0}$

Reduzierter Schlankheitsgrad der Randsteife:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\chi_d} \quad (\text{EN 1993-1-3; Gl. 5.16})$$

→ Nachfolgend wird **Schritt 2** wiederholt, um den korrigierten Abminderungsfaktor für die Steife zu ermitteln, so lange bis gilt:

$$\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)} \rightarrow \text{jedoch: } \chi_{d,n} < \chi_{d(n-1)}$$

Es kann keine generelle Aussage getroffen werden, wie viele Iterationen durchzuführen sind. In diesem Fall sind 2 Iterationen ausreichend, um die Bedingung $\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)}$ zu erfüllen. Die Ergebnisse der Iterationen sind mit allen wichtigen Zwischenwerten in Tab. Xx zusammengefasst.

Tab.4.10: Iterationen zur Berechnung der reduzierten wirksamen Fläche der Randsteife

Parameter			Einheit	Ausgangswert	1. Iteration	2. Iteration
Ransteife	Abminderungs-faktor	$\chi_{d(n-1)}$	o.E.	1,000	0,767	0,759
Gurt Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 4$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,933	0,933	0,933
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,817	0,812
	Abminderungs-faktor	ρ	o.E.	0,819	0,894	0,898
	Wirksame Breite	$b_{e2,c}$	mm	36,20	39,43	39,60
Lippe Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 0,5$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,722	0,722	0,722
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,632	0,629
	Abminderungs-Faktor	ρ	o.E.	1,000	1,000	1,000
	Wirksame Breite	$c_{eff,c}$	mm	24,50	24,50	24,50
Randsteife	Wirksame Fläche	A_s	mm ²	118,82	125,28	125,62
	Abstand	e'_s	mm	5,062	4,801	4,788
		b_1	mm	76,96	75,58	75,51
	Trägheitsmoment	I_s	mm ⁴	6778,8	6937,9	6945,9
	Federsteifigkeit	K	N/mm ²	0,348	0,363	0,364
	Verzweigungs-Spannung	$\sigma_{cr,s}$	N/mm ²	374,64	367,13	366,86
	Abminderungs-Faktor	$\chi_{d,n}$	o.E.	0,767	0,759	0,759
	Reduzierte Wirksame Fläche	$A_{s,red}$	mm ²	91,13	95,09	95,35

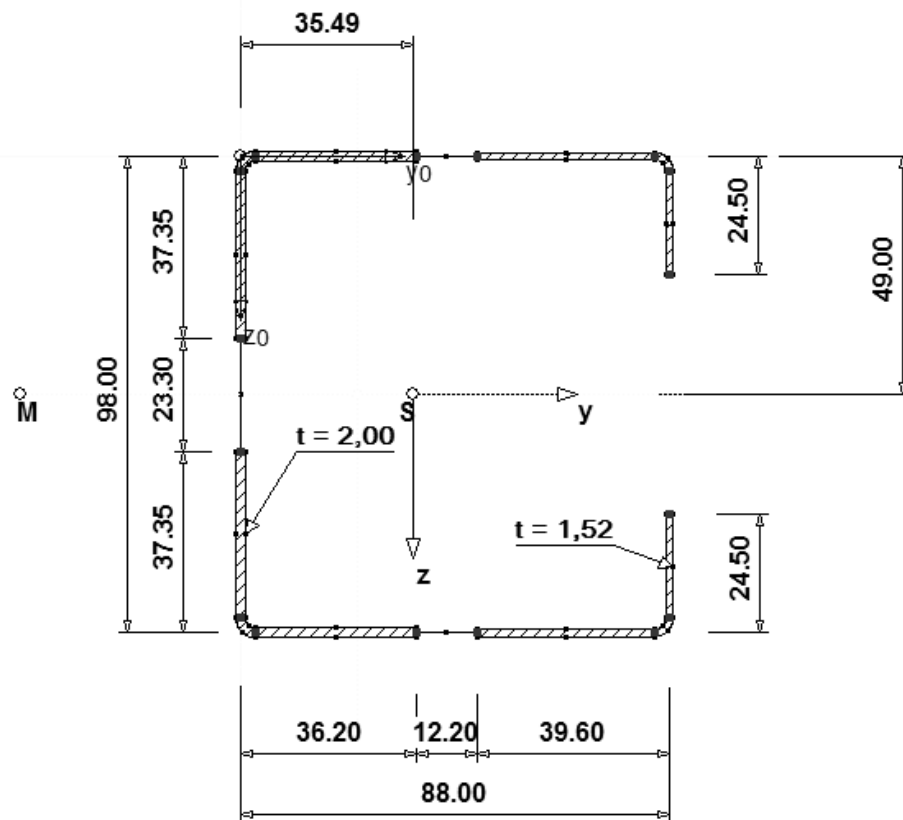
Querschnittswerte der reduzierten wirksamen Randsteife (Ergebnis der Iteration)

Gurt: $b_{e1,c} = 36,20\text{mm}$ $b_{e2,c} = 39,60\text{mm}$

Steg: $h_{e1,c} = h_{e2,c} = 37,35\text{mm}$

Lippe: $c_{\text{eff},c} = 24,50\text{mm}$

Randsteife: $t_{\text{red}} = t \cdot \frac{A_{s,\text{red}}}{A_s} = \chi \cdot t = 0,759 \cdot 2 = 1,52\text{mm}$



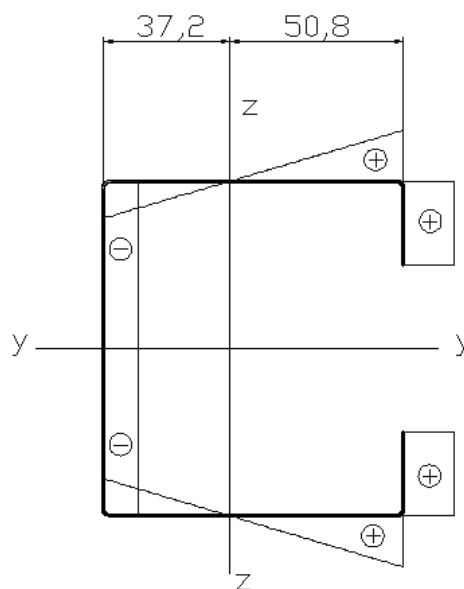
Tab.4.11: Effektive Querschnittswerte unter Druckbeanspruchung

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Fläche	A_{eff}	480	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung	$Y_{s,\text{eff}}$	35,49	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	$I_{\text{eff},y}$	87,40	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	$I_{\text{eff},z}$	58,02	mm
Schwerpunktverschiebung in y- Richtung $e_{N,Y} = y_s - y_{s,\text{eff}} = 37,22\text{mm} - 35,49\text{mm}$	$e_{N,Y}$	1,73	mm

4.2.3.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse

Während der Bruttoquerschnitt einer reinen Druckbeanspruchung unterliegt, wird der wirksame Querschnitt nun durch Druck- und gleichzeitige Biegebeanspruchung um die z-z-Achse belastet. Dies resultiert aus der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirksamen Querschnitt in Richtung der y-y-Achse, die aufgrund der nunmehr exzentrischen Normalkraft am wirksamen Querschnitt eine zusätzliche Biegebeanspruchung M_z hervorruft. Somit muss folgend die Biegetragfähigkeit des dünnwandigen Querschnitts bestimmt werden.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse (Druck positiv):



Spannungsverhältnis:
$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-(b_t - g_r)}{b_c - g_r}$$

$$\psi = \frac{-(37,2 - 0,88)}{50,8 - 0,88} = -0,728$$

Druckspannung:
$$\sigma_{\text{cam,ED}} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = \text{const.}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges:

Steg ist zugbeansprucht → Steg ist voll wirksam

- Wirksame Fläche der Gurte mit gedrückter Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert:

$$k_{\sigma} = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,728) + 9,78 \cdot (-0,728)^2$$

$$k_{\sigma} = 17,57 \quad (\text{EN 1993-1-5, Tab. 4.1})$$

Beulschlankheit:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{17,57}} = 0,448 \leq 0,854$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0$ (EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p / (1 - \psi) = 1,0 \cdot 86,24 / (1 - (-0,728)) = 49,91 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 49,91 = 19,96 \text{ mm}$$

$$b_{e1,c} = b_{e1} + g_r = 19,96 + 0,88 = 20,84 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 48,72 = 29,96 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Bezeichnung nach EN 1993-1-3:

$$b_{e1,web,c} = b_t + b_{e2} = 37,2 + 29,9 = 67,16 \text{ mm}$$

$$b_{e2,lip,c} = b_{e1,c} = 20,84 \text{ mm}$$

Randsteife (einseitig gestützte Platte)*Allgemeine Randbedingung:*

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert:

Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulschlankheit:

$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$c_{eff} = \rho * b_{p,c} = 1,0 * 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche: $A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$

$$A_s = (20,84 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 88,10 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{88,10} \right)$$

$$e_s = 6,828 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(20,84 - 3) \cdot 2 \cdot ((20,84 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{88,10}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 4,94 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 4,94 = 83,06 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$I_S = 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3$$

$$+ (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2$$

$$I_S = 1/12 \cdot (20,84 - 3) \cdot 2^3 + (20,84 - 3) \cdot 2 \cdot 6,828^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3$$

$$+ (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 6,828 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 6,828)^2$$

$$I_S = 5706,7 \text{ mm}^4$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 83,06 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f}$$

$$K = \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{83,06^2 \cdot 98,0 + 83,06^3 + 0,5 \cdot 83,06^2 \cdot 98,0 \cdot 1}$$

$$K = 0,291 \text{ N / mm}^2$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,291 \cdot 210000 \cdot 5706,7}}{88,10} = 423,94 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Seitenfläche unter Berücksichtigung des Knickens der
Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{423,94}} = 0,915 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \overline{\lambda}_d$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,915 = 0,808$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

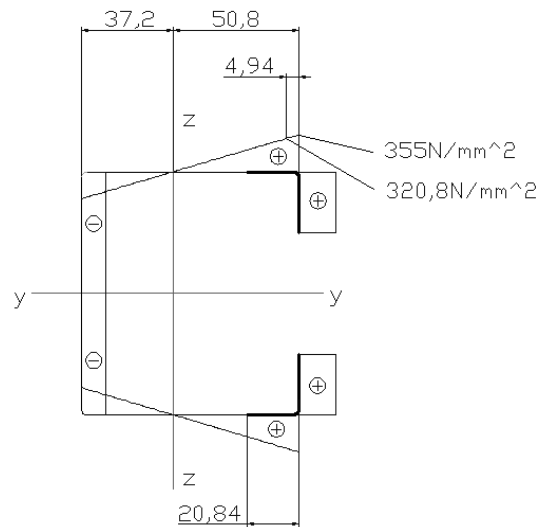
Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife:

$$A_{s,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}} \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.17})$$

→ Dabei ist $\sigma_{com,ED}$ die am wirksamen Querschnitt ermittelte

Druckspannung in der Schwerlinie der Steife.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse:



$$\sigma_{com,ED} = \frac{355 \cdot (50,8 - 4,94)}{50,8} = 320,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}} = 0,808 \cdot 88,10 \cdot \frac{355/1}{320,5} = 78,85 \text{ mm}^2$$

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife nach [EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2]

Da beide Gurte und Lippen voll wirksam sind, ist keine Optimierung/Iteration der Ergebnisse aus Schritt 1 und Schritt 2 notwendig!

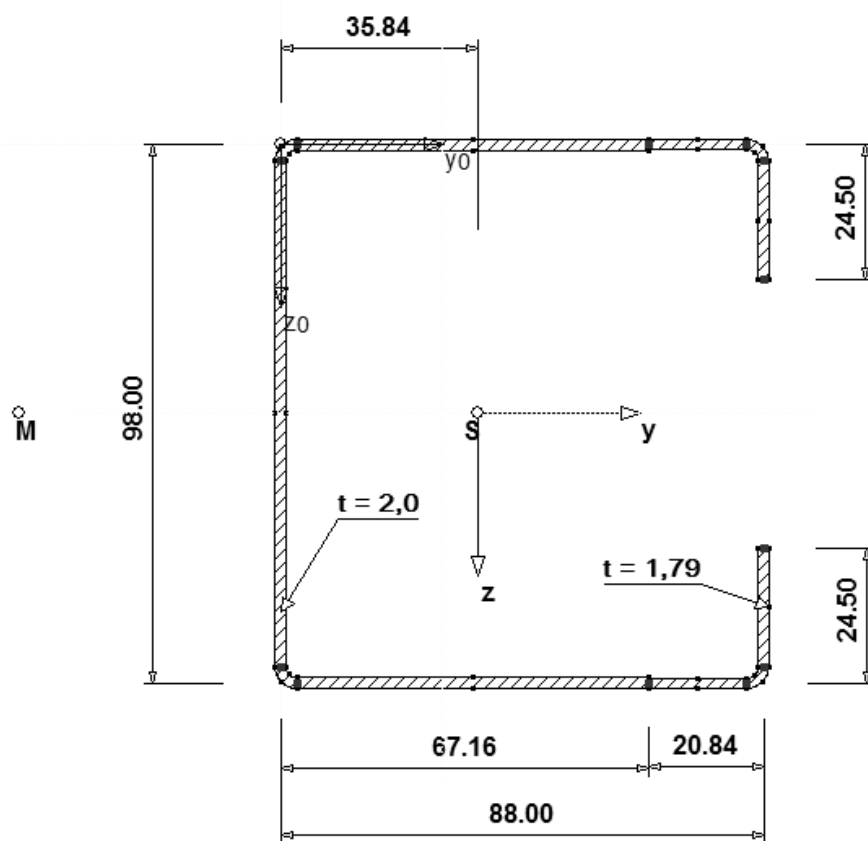
Querschnittswerte der reduzierten wirksamen Randsteife

Gurt: $b_{e1,web,c} = 67,16 \text{ mm} \quad b_{e2,lip,c} = 20,84 \text{ mm}$

Steg: $h_{e1,c} = h_{e2,c} = 49,00 \text{ mm}$

Lippe: $c_{eff,c} = 24,50 \text{ mm}$

Randsteife: $t_{red} = t \cdot \frac{A_{s,red}}{A_s} = 2 \cdot \frac{78,85}{88,10} = 1,79 \text{ mm}$

Wirksamer Querschnitt unter reiner Biegebeanspruchung um die z-z-Achse

Tab.4.12: Effektive Querschnittswerte unter Biegebeanspruchung

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Fläche	A_{eff}	617	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung	$Y_{s,\text{eff}}$	35,84	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	$I_{\text{eff},y}$	107,98	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	$I_{\text{eff},z}$	70,57	cm ⁴
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 53,05mm)	$W_{\text{eff},z,\text{lip}}$	13,30	cm ³
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 36,84mm)	$W_{\text{eff},z,\text{web}}$	19,16	cm ³

4.2.3.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.1]

Aufgrund der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirksamen Querschnitt ergibt sich eine Querschnittsbeanspruchung aus Druck und einaxialer Biegung um die z-z-Achse.

Der wirksame Querschnitt unter Druck- und Biegebeanspruchung um die z-z-Achse sollte folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} \leq 1 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 6.25})$$

Beanspruchbarkeit für reinen Druck (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.3):

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{Mo}} = 480 \cdot 355 = 170400 N = 170,4 kN \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 6.2})$$

Zusatzmoment (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.9(2)):

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 1,73 mm$$

Biegebeanspruchbarkeit um die z-z-Achse (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.4):

$$M_{cz,Rd,com} = W_{z,eff,com} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{M0}} = 13,30 \cdot \frac{35,5}{1,0} = 472,15 kNcm$$

Wirksame Querschnittstragfähigkeit:

$$\frac{N_{Ed}}{170,4} + \frac{N_{Ed} \cdot 1,73 \cdot 10^{-1}}{472,15} \leq 1 \quad \rightarrow \quad N_{Ed} = 160,39 kN$$

4.2.3.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität [EN 1993-1-3, Abs. 6.2]

a) Beanspruchbarkeit des Druckstabes [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2 + 6.2.3]

→ Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] ist die Beanspruchbarkeit eines Bauteils mit dem wirksamen Querschnitt für die Versagensformen Biegeknicken, Drillknicken und Biegedrillknicken zu ermitteln. Die kleinste Beanspruchbarkeit ist dabei die maßgebende Grenztragfähigkeit des Bauteils.

Biegeknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2):

→ Da $I_z < I_y$ ist die Biegeknickbeanspruchbarkeit um die z-z-Achse maßgebend!

Bezugsschlankheitsgrad: $\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot 0,814 = 76,43$
(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.3)

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr} \cdot \sqrt{A_{eff} / A}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{1500 \cdot \sqrt{480 / 636}}{34,3 \cdot 76,43} = 0,497 \quad (\text{EN 1993-1-1, Gl. (6.51)})$$

Imperfektionsbeiwert: Knicklinie „b“ nach [EN 1993-1-3, Tab. 6.3]

$$\rightarrow \alpha = 0,34 \quad (\text{EN 1993-1-1, Tab. 6.1})$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwert: } \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] \\ \phi &= 0,5 \left[1 + 0,34(0,497 - 0,2) + 0,497^2 \right] = 0,673 \\ &(\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2}) \end{aligned}$$

Abminderungsfaktor für Biegeknicken:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}}$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,673 + \sqrt{0,673^2 - 0,497^2}} = 0,887$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegeknicken des wirksamen Querschnitts um die maßgebende Achse unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,887 \cdot 480 \cdot 355}{1,0} = 151145 N = 151,15 kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

Biegedrillknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3):

Bei Bauteilen mit einfach symmetrischem Querschnitt muss berücksichtigt werden, dass die Tragfähigkeit infolge Drillknickens oder Biegedrillknickens geringer sein kann, als beim Biegeknicken.

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 74,66}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 687,74 kN$$

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die y-y-Achse:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 111,39}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 1026,08 kN$$

Kritische Verzweigungslast Drillknicken:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(G \cdot I_T + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_T^2} \right) \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. (6.33a)})$$

$$\rightarrow \text{dabei ist: } i_0^2 = i_z^2 + i_y^2 + y_0^2 + z_0^2 = 34,3^2 + 41,9^2 + 86,56^2 = 10425$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.33b))

$$N_{cr,T} = \frac{1}{10425 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(8076,9 \cdot 0,080 + \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2243,28}{1500^2 \cdot 10^{-2}} \right) = 204,42 kN$$

Kritische Verzweigungslast Biegedrillknicken:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2 \cdot \beta} \cdot \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right]$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.35))

$$\rightarrow \text{mit: } \beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 = 1 - \frac{86,56^2}{10425} = 0,281$$

$$N_{cr,TF} = \frac{1026,08}{2 \cdot 0,281} \cdot \left[1 + \frac{204,42}{1026,08} - \sqrt{\left(1 - \frac{204,42}{1026,08} \right)^2 + 4 \cdot \frac{86,56^2}{10425} \cdot \frac{204,42}{1026,08}} \right] = 177,86 \text{ kN}$$

$$N_{cr,TF} = 177,86 \text{ kN} \leq N_{cr,T} = 204,42 \text{ kN}$$

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken:

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{N_{cr,TF}}} = \sqrt{\frac{480 \cdot 355}{177,86 \cdot 10^3}} = 0,979 \geq 0,2 \quad (\text{EN 1993-1-1, Gl. (6.53)})$$

Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] und [EN 1993-1-3, Tab. 6.3] wird als Abminderungskurve zur Berücksichtigung des Biegedrillknickens von C- Profilen die europäische Knickspannungslinie „b“ verwendet.

$$\text{Imperfektionsbeiwert: } \alpha = 0,34$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwert: } \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right] \\ \phi &= 0,5 \left[1 + 0,34 \cdot (0,979 - 0,2) + 0,979^2 \right] = 1,112 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken:

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{TF}^2}}$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{1,112 + \sqrt{1,112^2 - 0,979^2}} = 0,610$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegedrillknicken des wirksamen Querschnitts unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_{TF} \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,610 \cdot 480 \cdot 355}{1,0} = 103944 N = 103,94 kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

→ Die minimale Beanspruchbarkeit des Druckstabes ergibt sich durch das globale Stabilitätsproblem Biegedrillknicken.

$$\mathbf{N_{b,Rd} = 103,94kN}$$

b) Biegedrillknickbeanspruchbarkeit (Momententragfähigkeit) des Biegeträgers

Die Biegedrillknickbeanspruchbarkeit von Biegeträgern der QK 4 sollte mit der europ. Knickspannungslinie „b“ bestimmt werden [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.4].

Ideal- kritisches Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken nach [DIN 4114]:

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_T^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{I_w}{I_y} + \frac{L_T^2 \cdot G \cdot I_T}{\pi^2 \cdot E \cdot I_y} + \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right)^2} - \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 111,39}{150^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{2243,28}{111,39} + \frac{150^2 \cdot 8076,9 \cdot 0,080}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 111,39} + \left(\frac{-1,84}{3} - 8,656\right)^2} - \left(\frac{-1,84}{3} - 8,656\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = 20110 \text{ kNcm}$$

Bezogener Biegedrillknickschlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{eff,z, lip} \cdot f_{yb}}{M_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{13,30 \cdot 35,5}{20110}} = 0,153 < 0,2 \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$\rightarrow \chi_{TF} = 1,0$$

Biegedrillknickbeanspruchbarkeit:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot w_z \cdot f_{yb} / \gamma_{M1} \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$M_{b,Rd} = 1,0 \cdot 13,30 \cdot 35,5 / 1,0 = 472,15 \text{ kNcm}$$

→ Die maximale Biegebeanspruchbarkeit bei Biegung um die z-z-Achse beträgt:

$$\mathbf{M_{b,Rd} = 472,15 kNcm}$$

c) Grenztragfähigkeit des Querschnitts unter Druck- und Biegebeanspruchung (Interaktionsnachweis) nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5]

Bemessungswert der Normalkraftbeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(a)):

$$N_{b,Rd} = 103,94 \text{ kN}$$

Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(b)):

$$M_{b,Rd} = 472,15 \text{ kNm}$$

Zusatzmoment aus Schwerpunktverschiebung von A zu A_{eff}:

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 1,73 \text{ mm}$$

Interaktionsnachweis für Biegung und zentrische Druckkraft:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1,0 \quad (\text{EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5})$$

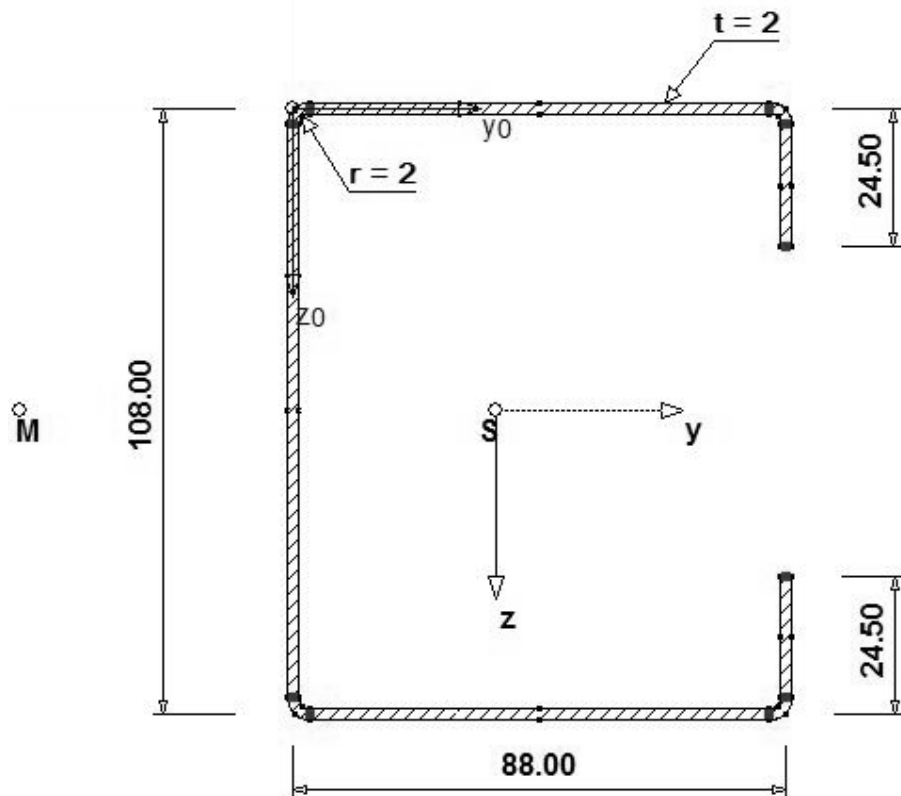
$$\left(\frac{N_{Ed}}{103,94} \right)^{0,8} + \left(\frac{N_{Ed} \cdot 0,173}{472,15} \right)^{0,8} \leq 1,0$$

$$\rightarrow \quad N_{Ed} = 95,15 \text{ kN}$$

Das Grenzzustand der Tragfähigkeit für das Profil C100/90/2 unter reiner Druckbeanspruchung ist bei einer Normalkraft von 95,15 kN erreicht.

4.2.4 Querschnitt C 110x90x2

→ Die Bemaßung bezieht sich auf die Querschnittsmittellinien.



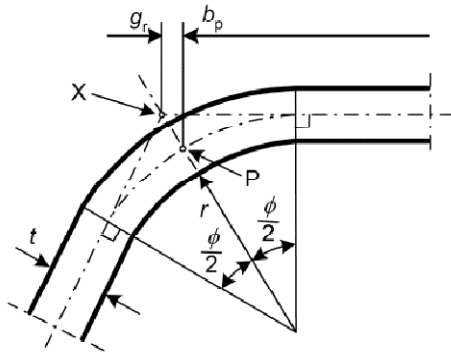
4.2.4.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung

Tab.4.13: Querschnittswerte C110/90/2

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Profilhöhe (Außenkante)	h	110,00	mm
Profilbreite (Außenkante)	b	90,00	mm
Blechdicke	t	2,00	mm
Lippenlänge	c	24,50	mm
Biegeradius (innen)	r	2,00	mm
Fläche	A	656	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung vom Steg	y_s	36,08	mm
Schwerpunktabstand in y-Richtung Von der Lippe	y_s'	51,92	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	I_y	138,13	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	I_z	77,34	cm ⁴
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 52,92mm)	$W_{z, lip}$	14,62	cm ³
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 37,08mm)	$W_{z, web}$	20,86	cm ³
Trägheitsradius	i_z	34,3	mm
Trägheitsradius	i_y	45,9	mm
Abstand Schubmittelpunkt von Schwerpunkt	y_0	84,69	mm
Torsionsträgheitsmoment	I_T	0,090	cm ⁴
Wölbwiderstand	$I_{<\omega>}$	2622,19	cm ⁶
Querschnittsstrecke	r_z	-23,4	mm

Querschnittsidealisierung:

Einfluss der Eckausrundung nach [EN 1993-1-1, Abs. 5.1]:



$$r_m = r + t / 2 = 2 + 1 = 3mm$$

$$g_r = r_m \cdot (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 0,88mm$$

$$u = \frac{\pi}{2} \cdot r_m = \frac{\pi}{2} \cdot 3 = 4,71 \text{ mm}$$

$$x_m = 0,638 \cdot r_m = 0,638 \cdot 3 = 1,91mm$$

$$I_{y,RC} = I_{z,RC} = \frac{t \cdot r_m^3}{12} = \frac{2 \cdot 3^3}{12} = 4,5 mm^4$$

Für die weitere Berechnung sind außerdem folgende Querschnittsabmessungen bezogen auf die Querschnittsmittellinien von Bedeutung:

Nennwert der geraden Höhe: $h_w = h - 2g_r = 108 - 2 \cdot 0,88 = 106,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Breite: $b_p = b - 2 \cdot g_r = 88 - 2 \cdot 0,88 = 86,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Lippenlänge: $b_{p,c} = b_{bc,c} - g_r = 24,5 - 0,88 = 23,62 \text{ mm}$

4.2.4.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben

- *Teilsicherheitsbeiwert für das Material:*

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$$

→ laut nationaler Empfehlung ist für Deutschland $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$.
Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird aber nach allg. gültigem Eurocode, d.h. ohne nationale Empfehlung, mit $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ gerechnet!

- *Blechedicken und deren Toleranzen:*

Für Bleche und Träger gilt: $0,45\text{mm} \leq t_{\text{cor}} \leq 15\text{mm}$

$$t_{\text{vorh}} = t_{\text{cor}} = 2\text{mm}$$

→ Bedingung erfüllt!

- *Einfluss der Eckausrundungen:*

$$r/t = 3/2 = 1,5 \leq 5$$

$$r/\min(b_p, h_w) = 3/88 = 0,034 \leq 0,1$$

→ Der Einfluss der Eckausrundung darf vernachlässigt werden. Für die Berechnung der Bauteilsteifigkeit werden die Eckausrundungen aber immer berücksichtigt!

- *Geometrische Verhältnisse:*

$$b/t = 90/2 = 45 \leq 60$$

$$c/t = 25,5/2 = 12,75 \leq 50$$

$$h/t = 110/2 = 55 \leq 500$$

→ Bedingungen erfüllt!

- Zum Erlangen ausreichend hoher Steifigkeit und zur Vermeidung von vorzeitigen Versagen der Steifen sollten deren Abmessungen innerhalb folgender Grenze liegen:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6$$

$$c/b = 25,5/90 = 0,283$$

→ Bedingung erfüllt! Die Lippen können bei der Berechnung berücksichtigt werden.

- *Bedingungen für ebene Platten mit Randsteifen*

Der Winkel zwischen Steife und Blech beträgt 90° und befindet sich somit innerhalb der Grenzen von 45° - 135°

→ Die Berechnungsmethode für Randsteifen darf angewendet werden.

4.2.4.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung

- Spannungsverteilung infolge reinem Druck:

→ Die Spannung verteilt sich unter reiner Druckbeanspruchung gleichmäßig über den gesamten Querschnitt

Spannungsverhältnis: $\psi = 1$

Druckspannung: $\sigma_{\text{cam,ED}} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = \text{const.}$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges (einseitig gestützte Platte):

→ Steg: 4-seitig gelagerte Platte

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulslankheit: $\bar{\lambda}_p = \frac{h_w / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{106,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 1,149 \geq 0,673$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,149 - 0,055 \cdot 4}{1,149^2} = 0,704 \leq 1,0$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Steghöhe: $h_{\text{eff}} = \rho \cdot h_w = 0,704 \cdot 106,24 = 74,79 \text{ mm}$

$$h_{e1} = h_{e2} = 0,5 \cdot h_{\text{eff}} = 0,5 \cdot 74,79 = 37,40 \text{ mm}$$

$$h_{e1,c} = h_{e2,c} = 0,5 \cdot h_{\text{eff}} + g_r = 37,40 + 0,88 = 38,28 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

- Wirksame Fläche der gedrückten Gurte mit Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulschlankheit:
$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 0,933 \geq 0,673$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor:
$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2} = \frac{0,933 - 0,055 \cdot 4}{0,933^2} = 0,819 \leq 1,0$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:
$$b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0,819 \cdot 86,24 = 70,63mm$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 70,63 = 35,32mm$$

$$b_{e1,c} = b_{e2,c} = 0,5 \cdot b_{eff} + g_r = 35,32 + 0,88 = 36,20mm$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Randsteife (einseitig gestützte Platte)

Allgemeine Randbedingung:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert: Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulschlankheit:
$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:
$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} = 1,0 \cdot 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche:

$$A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$$

$$A_s = (36,20 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 118,82 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82} \right)$$

$$e_s = 5,062 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(36,20 - 3) \cdot 2 \cdot ((36,20 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 11,04 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 11,04 = 76,96 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$\begin{aligned}
 I_s &= 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3 \\
 &\quad + (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2 \\
 I_s &= 1/12 \cdot (36,20 - 3) \cdot 2^3 + (36,20 - 3) \cdot 2 \cdot 5,026^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3 \\
 &\quad + (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 5,026 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 5,026)^2 \\
 I_s &= 6778,8 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3; Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 76,96 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} \\
 K &= \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{76,96^2 \cdot 108 + 76,96^3 + 0,5 \cdot 76,96^2 \cdot 108 \cdot 1} \\
 K &= 0,326 \text{ N / mm}^2
 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,326 \cdot 210000 \cdot 6778,8}}{118,82} = 362,61 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{362,61}} = 0,989 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \overline{\lambda}_d$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,989 = 0,755$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

Reduzierte wirksame Steifenfläche unter Berücksichtigung des Knickens
der Randsteife:

$$A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}}$$

$$A_{S,red} = 0,755 \cdot 118,82 \cdot 1,0 = 89,71 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.17)

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

→ Wiederholung von **Schritt 1** mit den wirksamen Breiten der Randsteife infolge Forminstabilität unter Berücksichtigung der reduzierten

Tragspannung $\sigma_{cam,ED,i} = \chi_d \cdot f_{y,b} / \gamma_{M0}$

Reduzierter Schlankheitsgrad der Randsteife:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\chi_d} \quad (\text{EN 1993-1-3; Gl. 5.16})$$

→ Nachfolgend wird **Schritt 2** wiederholt, um den korrigierten Abminderungsfaktor für die Steife zu ermitteln, so lange bis gilt:

$$\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)} \rightarrow \text{jedoch: } \chi_{d,n} < \chi_{d(n-1)}$$

Es kann keine generelle Aussage getroffen werden, wie viele Iterationen durchzuführen sind. In diesem Fall sind 2 Iterationen ausreichend, um die Bedingung $\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)}$ zu erfüllen. Die Ergebnisse der Iterationen sind mit allen wichtigen Zwischenwerten in Tab. Xx zusammengefasst.

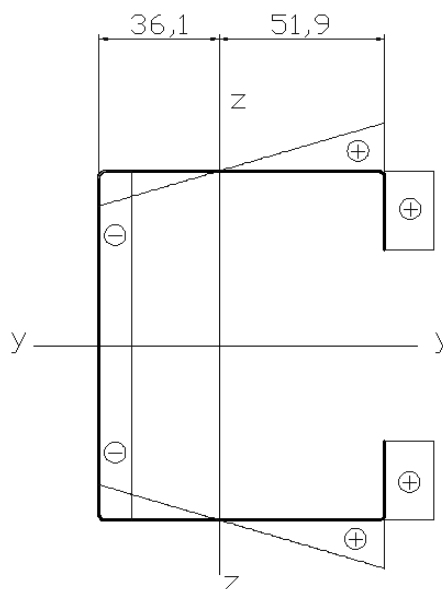
Tab.4.14: Iterationen zur Berechnung der reduzierten wirksamen Fläche der Randsteife

Parameter			Einheit	Ausgangswert	1. Iteration	2. Iteration
Ransteife	Abminderungs-faktor	$\chi_{d(n-1)}$	o.E.	1,000	0,755	0,747
Gurt Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 4$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,933	0,933	0,933
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,811	0,806
	Abminderungs-faktor	ρ	o.E.	0,819	0,899	0,902
	Wirksame Breite	$b_{e2,c}$	mm	36,20	39,65	39,77
Lippe Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 0,5$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,722	0,722	0,722
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,627	0,624
	Abminderungs-Faktor	ρ	o.E.	1,000	1,000	1,000
	Wirksame Breite	$c_{eff,c}$	mm	24,50	24,50	24,50
Randsteife	Wirksame Fläche	A_s	mm ²	118,82	125,72	125,96
	Abstand	e'_s	mm	5,062	4,785	4,775
		b_1	mm	76,96	75,48	75,43
	Trägheitsmoment	I_s	mm ⁴	6778,8	6948,2	6953,8
	Federsteifigkeit	K	N/mm ²	0,326	0,341	0,342
	Verzweigungs-Spannung	$\sigma_{cr,s}$	N/mm ²	362,61	354,85	354,83
	Abminderungs-Faktor	$\chi_{d,n}$	o.E.	0,755	0,747	0,747
	Reduzierte Wirksame Fläche	$A_{s,red}$	mm ²	89,71	93,91	94,09

4.2.4.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse

Während der Bruttoquerschnitt einer reinen Druckbeanspruchung unterliegt, wird der wirksame Querschnitt nun durch Druck- und gleichzeitige Biegebeanspruchung um die z-z-Achse belastet. Dies resultiert aus der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirksamen Querschnitt in Richtung der y-y-Achse, die aufgrund der nunmehr exzentrischen Normalkraft am wirksamen Querschnitt eine zusätzliche Biegebeanspruchung M_z hervorruft. Somit muss folgend die Biegetragfähigkeit des dünnwandigen Querschnitts bestimmt werden.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse (Druck positiv):



Spannungsverhältnis:
$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-(b_t - g_r)}{b_c - g_r}$$

$$\psi = \frac{-(36,1 - 0,88)}{51,9 - 0,88} = -0,690$$

Druckspannung:
$$\sigma_{\text{cam,ED}} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = \text{const.}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges:

Steg ist zugbeansprucht → Steg ist voll wirksam

- Wirksame Fläche der Gurte mit gedrückter Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert:

$$k_{\sigma} = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,690) + 9,78 \cdot (-0,690)^2$$

$$k_{\sigma} = 16,81 \quad (\text{EN 1993-1-5, Tab. 4.1})$$

Beulschlankheit:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{16,81}} = 0,455 \leq 0,851$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0$ (EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p / (1 - \psi) = 1,0 \cdot 86,24 / (1 - (-0,690)) = 51,03 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 51,03 = 20,41 \text{ mm}$$

$$b_{e1,c} = b_{e1} + g_r = 20,41 + 0,88 = 21,29 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 51,03 = 30,61 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Bezeichnung nach EN 1993-1-3:

$$b_{e1,web,c} = b_t + b_{e2} = 36,1 + 30,61 = 66,71 \text{ mm}$$

$$b_{e2,lip,c} = b_{e1,c} = 21,29 \text{ mm}$$

Randsteife (einseitig gestützte Platte)

Allgemeine Randbedingung:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert:

Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulschlankheit:

$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$c_{eff} = \rho * b_{p,c} = 1,0 * 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche: $A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$

$$A_s = (21,29 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 89,00 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{89,00} \right)$$

$$e_s = 6,759 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(21,29 - 3) \cdot 2 \cdot ((21,29 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{89,00}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 5,11 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 5,11 = 82,89 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$\begin{aligned}
 I_S &= 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3 \\
 &\quad + (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2 \\
 I_S &= 1/12 \cdot (21,29 - 3) \cdot 2^3 + (21,29 - 3) \cdot 2 \cdot 6,759^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3 \\
 &\quad + (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 6,759 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 6,759)^2 \\
 I_S &= 5748,5 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 82,89 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} \\
 K &= \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{82,89^2 \cdot 108,0 + 82,89^3 + 0,5 \cdot 82,89^2 \cdot 108,0 \cdot 1} \\
 K &= 0,274 \text{ N / mm}^2
 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,274 \cdot 210000 \cdot 5748,5}}{89,00} = 408,70 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Seitenfläche unter Berücksichtigung des Knickens der
Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad: $\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{408,70}} = 0,932 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor: $\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,932 = 0,796$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

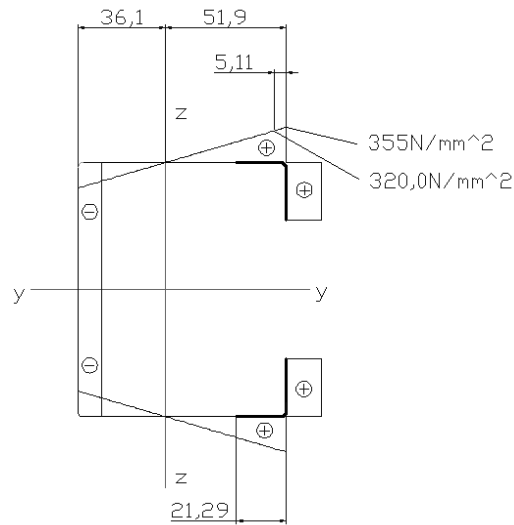
Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife:

$$A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}} \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.17})$$

→ Dabei ist $\sigma_{com,ED}$ die am wirksamen Querschnitt ermittelte

Druckspannung in der Schwerlinie der Steife.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse:



$$\sigma_{com,ED} = \frac{355 \cdot (51,9 - 5,11)}{51,9} = 320,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}} = 0,796 \cdot 89,00 \cdot \frac{355/1}{320,0} = 78,59 \text{ mm}^2$$

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife nach [EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2]

Da beide Gurte und Lippen voll wirksam sind, ist keine Optimierung/Iteration der Ergebnisse aus Schritt 1 und Schritt 2 notwendig!

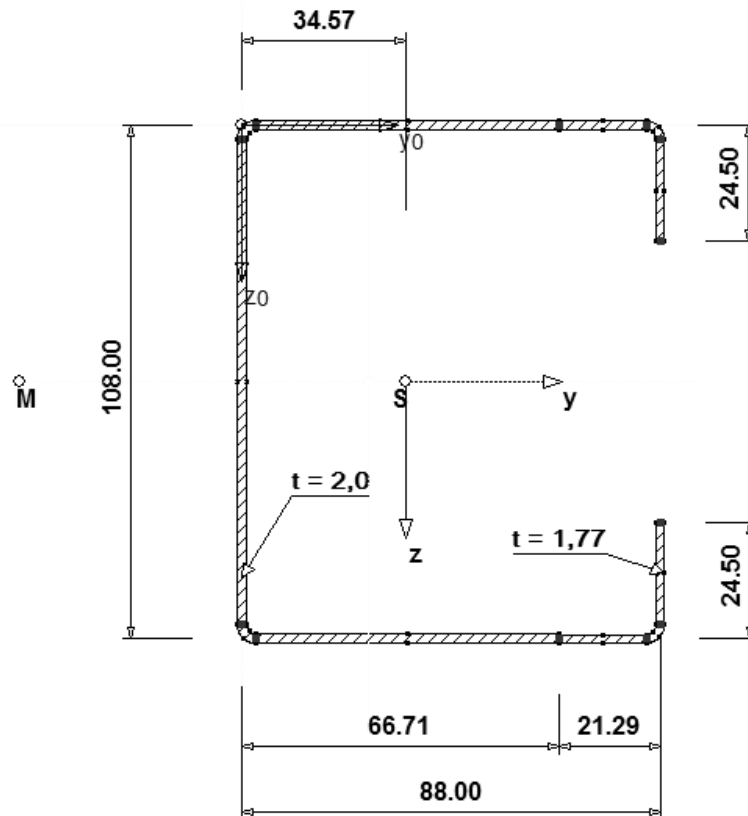
Querschnittswerte der reduzierten wirksamen Randsteife

Gurt: $b_{e1,web,c} = 66,71 \text{ mm} \quad b_{e2,lip,c} = 21,29 \text{ mm}$

Steg: $h_{e1,c} = h_{e2,c} = 54,00 \text{ mm}$

Lippe: $c_{eff,c} = 24,50 \text{ mm}$

Randsteife: $t_{red} = t \cdot \frac{A_{s,red}}{A_s} = 2 \cdot \frac{78,59}{89,00} = 1,77 \text{ mm}$

Wirksamer Querschnitt unter reiner Biegebeanspruchung um die z-z-Achse

Tab.4.16: Effektive Querschnittswerte unter Biegebeanspruchung

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Fläche	A_{eff}	635	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung	$Y_{s,\text{eff}}$	34,57	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	$I_{\text{eff},y}$	133,43	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	$I_{\text{eff},z}$	72,62	cm ⁴
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 54,31mm)	$W_{\text{eff},z,\text{lip}}$	13,37	cm ³
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 35,57mm)	$W_{\text{eff},z,\text{web}}$	20,41	cm ³

4.2.4.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.1]

Aufgrund der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirkamen Querschnitt ergibt sich eine Querschnittsbeanspruchung aus Druck und einaxialer Biegung um die z-z-Achse.

Der wirksame Querschnitt unter Druck- und Biegebeanspruchung um die z-z-Achse sollte folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} \leq 1 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 6.25})$$

Beanspruchbarkeit für reinen Druck (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.3):

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{Mo}} = 481 \cdot 355 = 170755 N = 170,76 kN \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 6.2})$$

Zusatzmoment (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.9(2)):

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 1,17 mm$$

Biegebeanspruchbarkeit um die z-z-Achse (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.4):

$$M_{cz,Rd,com} = W_{z,eff,com} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{M0}} = 13,37 \cdot \frac{35,5}{1,0} = 474,64 kNcm$$

Wirksame Querschnittstragfähigkeit:

$$\frac{N_{Ed}}{170,76} + \frac{N_{Ed} \cdot 1,17 \cdot 10^{-1}}{474,64} \leq 1 \quad \rightarrow \quad N_{Ed} = 163,86 kN$$

4.2.4.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität [EN 1993-1-3, Abs. 6.2]

a) Beanspruchbarkeit des Druckstabes [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2 + 6.2.3]

→ Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] ist die Beanspruchbarkeit eines Bauteils mit dem wirksamen Querschnitt für die Versagensformen Biegeknicken, Drillknicken und Biegedrillknicken zu ermitteln. Die kleinste Beanspruchbarkeit ist dabei die maßgebende Grenztragfähigkeit des Bauteils.

Biegeknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2):

→ Da $I_z < I_y$ ist die Biegeknickbeanspruchbarkeit um die z-z-Achse maßgebend!

Bezugsschlankheitsgrad: $\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot 0,814 = 76,43$
(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.3)

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr} \cdot \sqrt{A_{eff} / A}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{1500 \cdot \sqrt{481 / 656}}{34,3 \cdot 76,43} = 0,490 \quad (\text{EN 1993-1-1, Gl. (6.51)})$$

Imperfektionsbeiwert: Knicklinie „b“ nach [EN 1993-1-3, Tab. 6.3]

$$\rightarrow \alpha = 0,34 \quad (\text{EN 1993-1-1, Tab. 6.1})$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwert: } \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] \\ \phi &= 0,5 \left[1 + 0,34(0,490 - 0,2) + 0,490^2 \right] = 0,669 \\ &(\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2}) \end{aligned}$$

Abminderungsfaktor für Biegeknicken:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}}$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,669 + \sqrt{0,669^2 - 0,490^2}} = 0,889$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegeknicken des wirksamen Querschnitts um die maßgebende Achse unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,889 \cdot 481 \cdot 355}{1,0} = 151801N = 151,80kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

Biegedrillknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3):

Bei Bauteilen mit einfach symmetrischem Querschnitt muss berücksichtigt werden, dass die Tragfähigkeit infolge Drillknickens oder Biegedrillknickens geringer sein kann, als beim Biegeknicken.

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 77,34}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 712,43 kN$$

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die y-y-Achse:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 138,13}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 1272,40 kN$$

Kritische Verzweigungslast Drillknicken:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(G \cdot I_T + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_T^2} \right) \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. (6.33a)})$$

$$\rightarrow \text{dabei ist: } i_0^2 = i_z^2 + i_y^2 + y_0^2 + z_0^2 = 34,3^2 + 45,9^2 + 84,69^2 = 10456$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.33b))

$$N_{cr,T} = \frac{1}{10456 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(8076,9 \cdot 0,090 + \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 2622,19}{1500^2 \cdot 10^{-2}} \right) = 237,96 kN$$

Kritische Verzweigungslast Biegedrillknicken:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2 \cdot \beta} \cdot \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} \right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right]$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.35))

$$\rightarrow \text{mit: } \beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0} \right)^2 = 1 - \frac{84,69^2}{10456} = 0,314$$

$$N_{cr,TF} = \frac{1272,40}{2 \cdot 0,314} \cdot \left[1 + \frac{237,96}{1272,40} - \sqrt{\left(1 - \frac{237,96}{1272,40} \right)^2 + 4 \cdot \frac{84,69^2}{10456} \cdot \frac{237,96}{1272,40}} \right] = 209,63 \text{ kN}$$

$$N_{cr,TF} = 209,63 \text{ kN} \leq N_{cr,T} = 237,96 \text{ kN}$$

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken:

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{N_{cr,TF}}} = \sqrt{\frac{481 \cdot 355}{209,63 \cdot 10^3}} = 0,903 \geq 0,2 \quad (\text{EN 1993-1-1, Gl. (6.53)})$$

Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] und [EN 1993-1-3, Tab. 6.3] wird als Abminderungskurve zur Berücksichtigung des Biegedrillknickens von C- Profilen die europäische Knickspannungslinie „b“ verwendet.

$$\text{Imperfektionsbeiwert: } \alpha = 0,34$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwert: } \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right] \\ \phi &= 0,5 \left[1 + 0,34 \cdot (0,903 - 0,2) + 0,903^2 \right] = 1,027 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken:

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{TF}^2}}$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{1,027 + \sqrt{1,027^2 - 0,903^2}} = 0,660$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegedrillknicken des wirksamen Querschnitts unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_{TF} \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,660 \cdot 481 \cdot 355}{1,0} = 112698N = 112,7kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

→ Die minimale Beanspruchbarkeit des Druckstabes ergibt sich durch das globale Stabilitätsproblem Biegedrillknicken.

$$\mathbf{N_{b,Rd} = 112,70kN}$$

b) Biegedrillknickbeanspruchbarkeit (Momententragfähigkeit) des Biegeträgers

Die Biegedrillknickbeanspruchbarkeit von Biegeträgern der QK 4 sollte mit der europ. Knickspannungslinie „b“ bestimmt werden [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.4].

Ideal- kritisches Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken nach [DIN 4114]:

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_T^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{I_w}{I_y} + \frac{L_T^2 \cdot G \cdot I_T}{\pi^2 \cdot E \cdot I_y} + \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right)^2} - \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 138,13}{150^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{2622,19}{138,13} + \frac{150^2 \cdot 8076,9 \cdot 0,090}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 138,13} + \left(\frac{-2,34}{3} - 8,469\right)^2} - \left(\frac{-2,34}{3} - 8,469\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = 24813 \text{ kNcm}$$

Bezogener Biegedrillknickschlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{eff,z,tip} \cdot f_{yb}}{M_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{13,37 \cdot 35,5}{24813}} = 0,138 < 0,2 \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$\rightarrow \chi_{TF} = 1,0$$

Biegedrillknickbeanspruchbarkeit:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot w_z \cdot f_{yb} / \gamma_{M1} \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$M_{b,Rd} = 1,0 \cdot 13,37 \cdot 35,5 / 1,0 = 474,64 \text{ kNcm}$$

→ Die maximale Biegebeanspruchbarkeit bei Biegung um die z-z-Achse beträgt:

$$\mathbf{M_{b,Rd} = 474,64 \text{ kNcm}}$$

c) Grenztragfähigkeit des Querschnitts unter Druck- und Biegebeanspruchung (Interaktionsnachweis) nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5]

Bemessungswert der Normalkraftbeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(a)):

$$N_{b,Rd} = 112,7 \text{ kN}$$

Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(b)):

$$M_{b,Rd} = 474,64 \text{ kNm}$$

Zusatzmoment aus Schwerpunktverschiebung von A zu A_{eff}:

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 1,17 \text{ mm}$$

Interaktionsnachweis für Biegung und zentrische Druckkraft:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1,0 \quad (\text{EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5})$$

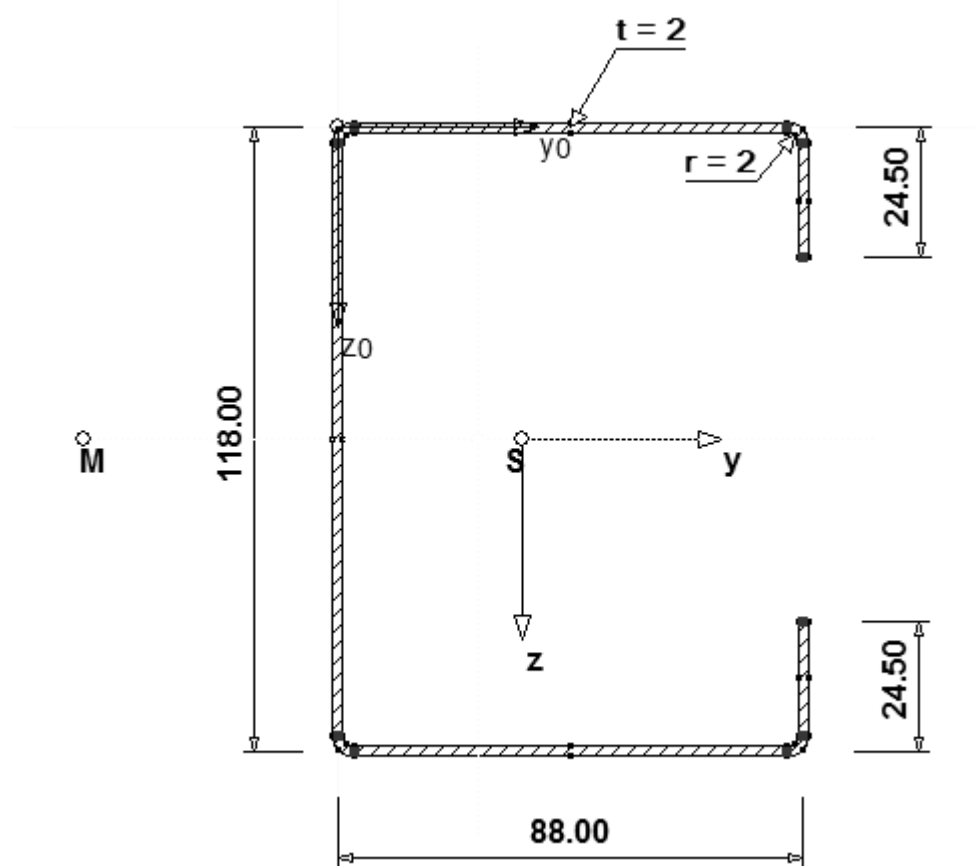
$$\left(\frac{N_{Ed}}{112,7} \right)^{0,8} + \left(\frac{N_{Ed} \cdot 0,117}{474,64} \right)^{0,8} \leq 1,0$$

$$\rightarrow \quad N_{Ed} = 105,17 \text{ kN}$$

Das Grenzzustand der Tragfähigkeit für das Profil C110/90/2 unter reiner Druckbeanspruchung ist bei einer Normalkraft von 105,17kN erreicht.

4.2.5 Querschnitt C 120x90x2

→ Die Bemaßung bezieht sich auf die Querschnittsmittellinien.



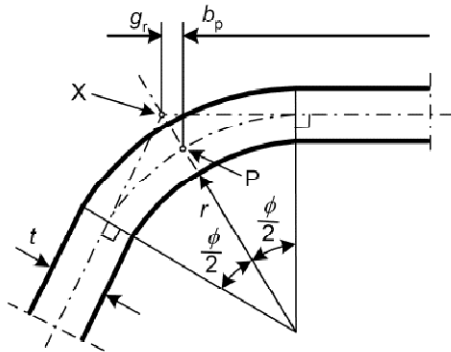
4.2.5.1 Querschnittswerte und Querschnittsidealisierung

Tab.4.17: Querschnittswerte C120/90/2

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Profilhöhe (Außenkante)	h	120,00	mm
Profilbreite (Außenkante)	b	90,00	mm
Blechdicke	t	2,00	mm
Lippenlänge	c	24,50	mm
Biegeradius (innen)	r	2,00	mm
Fläche	A	676	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung vom Steg	y_s	35,01	mm
Schwerpunktabstand in y-Richtung Von der Lippe	y_s'	52,99	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	I_y	168,15	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	I_z	79,87	cm ⁴
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 53,99mm)	$W_{z, lip}$	14,79	cm ³
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 36,01mm)	$W_{z, web}$	22,18	cm ³
Trägheitsradius	i_z	34,4	mm
Trägheitsradius	i_y	49,9	mm
Abstand Schubmittelpunkt von Schwerpunkt	y_0	82,88	mm
Torsionsträgheitsmoment	I_T	0,090	cm ⁴
Wölbwiderstand	$I_{<\omega>}$	3043,39	cm ⁶
Querschnittsstrecke	r_z	-28,8	mm

Querschnittsidealisierung:

Einfluss der Eckausrundung nach [EN 1993-1-1, Abs. 5.1]:



$$r_m = r + t / 2 = 2 + 1 = 3 \text{ mm}$$

$$g_r = r_m \cdot (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 0,88 \text{ mm}$$

$$u = \frac{\pi}{2} \cdot r_m = \frac{\pi}{2} \cdot 3 = 4,71 \text{ mm}$$

$$x_m = 0,638 \cdot r_m = 0,638 \cdot 3 = 1,91 \text{ mm}$$

$$I_{y,RC} = I_{z,RC} = \frac{t \cdot r_m^3}{12} = \frac{2 \cdot 3^3}{12} = 4,5 \text{ mm}^4$$

Für die weitere Berechnung sind außerdem folgende Querschnittsabmessungen bezogen auf die Querschnittsmittellinien von Bedeutung:

Nennwert der geraden Höhe: $h_w = h - 2 g_r = 118 - 2 \cdot 0,88 = 116,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Breite: $b_p = b - 2 \cdot g_r = 88 - 2 \cdot 0,88 = 86,24 \text{ mm}$

Nennwert der geraden Lippenlänge: $b_{p,c} = b_{bc,c} - g_r = 24,5 - 0,88 = 23,62 \text{ mm}$

4.2.5.2 Überprüfung der Einhaltung der allgemeinen Vorgaben

- *Teilsicherheitsbeiwert für das Material:*

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$$

→ laut nationaler Empfehlung ist für Deutschland $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$.
Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wird aber nach allg. gültigem Eurocode, d.h. ohne nationale Empfehlung, mit $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,0$ gerechnet!

- *Blechedicken und deren Toleranzen:*

Für Bleche und Träger gilt: $0,45\text{mm} \leq t_{\text{cor}} \leq 15\text{mm}$

$$t_{\text{vorh}} = t_{\text{cor}} = 2\text{mm}$$

→ Bedingung erfüllt!

- *Einfluss der Eckausrundungen:*

$$r/t = 3/2 = 1,5 \leq 5$$

$$r/\min(b_p, h_w) = 3/88 = 0,034 \leq 0,1$$

→ Der Einfluss der Eckausrundung darf vernachlässigt werden. Für die Berechnung der Bauteilsteifigkeit werden die Eckausrundungen aber immer berücksichtigt!

- *Geometrische Verhältnisse:*

$$b/t = 90/2 = 45 \leq 60$$

$$c/t = 25,5/2 = 12,75 \leq 50$$

$$h/t = 120/2 = 60 \leq 500$$

→ Bedingungen erfüllt!

- Zum Erlangen ausreichend hoher Steifigkeit und zur Vermeidung von vorzeitigen Versagen der Steifen sollten deren Abmessungen innerhalb folgender Grenze liegen:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6$$

$$c/b = 25,5/90 = 0,283$$

→ Bedingung erfüllt! Die Lippen können bei der Berechnung berücksichtigt werden.

- *Bedingungen für ebene Platten mit Randsteifen*

Der Winkel zwischen Steife und Blech beträgt 90° und befindet sich somit innerhalb der Grenzen von 45° - 135°

→ Die Berechnungsmethode für Randsteifen darf angewendet werden.

4.2.5.3 Wirksame Fläche A_{eff} unter Druckbeanspruchung

- Spannungsverteilung infolge reinem Druck:

→ Die Spannung verteilt sich unter reiner Druckbeanspruchung gleichmäßig über den gesamten Querschnitt

Spannungsverhältnis: $\psi = 1$

Druckspannung: $\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges (einseitig gestützte Platte):

→ Steg: 4-seitig gelagerte Platte

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulslankheit: $\bar{\lambda}_p = \frac{h_w / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{116,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 1,257 \geq 0,673$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,257 - 0,055 \cdot 4}{1,257^2} = 0,656 \leq 1,0$
(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Steghöhe: $h_{eff} = \rho \cdot h_w = 0,656 \cdot 116,24 = 76,25 \text{ mm}$

$$h_{e1} = h_{e2} = 0,5 \cdot h_{eff} = 0,5 \cdot 76,25 = 38,13 \text{ mm}$$

$$h_{e1,c} = h_{e2,c} = 0,5 \cdot h_{eff} + g_r = 38,13 + 0,88 = 39,01 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

- Wirksame Fläche der gedrückten Gurte mit Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert: $k_{\sigma} = 4,0$ (EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Beulschlankheit:
$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{4}} = 0,933 \geq 0,673$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor:
$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_p^2} = \frac{0,933 - 0,055 \cdot 4}{0,933^2} = 0,819 \leq 1,0$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten: $b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0,819 \cdot 86,24 = 70,63mm$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 70,63 = 35,32mm$$

$$b_{e1,c} = b_{e2,c} = 0,5 \cdot b_{eff} + g_r = 35,32 + 0,88 = 36,20mm$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Randsteife (einseitig gestützte Platte)

Allgemeine Randbedingung:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert: Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulschlankheit:
$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:
$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c} = 1,0 \cdot 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche:

$$A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$$

$$A_s = (36,20 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 118,82 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82} \right)$$

$$e_s = 5,062 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(36,20 - 3) \cdot 2 \cdot ((36,20 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{118,82}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 11,04 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 11,04 = 76,96 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$\begin{aligned}
 I_s &= 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3 \\
 &\quad + (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2 \\
 I_s &= 1/12 \cdot (36,20 - 3) \cdot 2^3 + (36,20 - 3) \cdot 2 \cdot 5,026^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3 \\
 &\quad + (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 5,026 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 5,026)^2 \\
 I_s &= 6778,8 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3; Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 76,96 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} \\
 K &= \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{76,96^2 \cdot 118 + 76,96^3 + 0,5 \cdot 76,96^2 \cdot 118 \cdot 1} \\
 K &= 0,307 \text{ N / mm}^2
 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,307 \cdot 210000 \cdot 6778,8}}{118,82} = 351,88 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad:

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$$

$$\overline{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{351,88}} = 1,004 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \overline{\lambda}_d$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 1,004 = 0,744$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

Reduzierte wirksame Steifenfläche unter Berücksichtigung des Knickens der Randsteife:

$$A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}}$$

$$A_{S,red} = 0,744 \cdot 118,82 \cdot 1,0 = 88,40 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.17)

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

→ Wiederholung von **Schritt 1** mit den wirksamen Breiten der Randsteife infolge Forminstabilität unter Berücksichtigung der reduzierten

Tragspannung $\sigma_{cam,ED,i} = \chi_d \cdot f_{y,b} / \gamma_{M0}$

Reduzierter Schlankheitsgrad der Randsteife:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\chi_d} \quad (\text{EN 1993-1-3; Gl. 5.16})$$

→ Nachfolgend wird **Schritt 2** wiederholt, um den korrigierten Abminderungsfaktor für die Steife zu ermitteln, so lange bis gilt:

$$\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)} \rightarrow \text{jedoch: } \chi_{d,n} < \chi_{d(n-1)}$$

Es kann keine generelle Aussage getroffen werden, wie viele Iterationen durchzuführen sind. In diesem Fall sind 2 Iterationen ausreichend, um die Bedingung $\chi_{d,n} \approx \chi_{d(n-1)}$ zu erfüllen. Die Ergebnisse der Iterationen sind mit allen wichtigen Zwischenwerten in Tab. Xx zusammengefasst.

Tab.4.18: Iterationen zur Berechnung der reduzierten wirksamen Fläche der Randsteife

Parameter			Einheit	Ausgangswert	1. Iteration	2. Iteration
Ransteife	Abminderungs-faktor	$\chi_{d(n-1)}$	o.E.	1,000	0,744	0,735
Gurt Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 4$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,933	0,933	0,933
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,805	0,800
	Abminderungs-faktor	ρ	o.E.	0,819	0,903	0,906
	Wirksame Breite	$b_{e2,c}$	mm	36,20	39,82	39,95
Lippe Dehnungsverhältnis: $\psi = 1$ Beulwert: $k_\sigma = 0,5$	Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_p$	o.E.	0,722	0,722	0,722
	Abgeminderte Beulschlankheit	$\bar{\lambda}_{p,red}$	o.E.		0,623	0,619
	Abminderungs-Faktor	ρ	o.E.	1,000	1,000	1,000
	Wirksame Breite	$c_{eff,c}$	mm	24,50	24,50	24,50
Randsteife	Wirksame Fläche	A_s	mm ²	118,82	126,06	126,32
	Abstand	e'_s	mm	5,062	4,772	4,762
		b_1	mm	76,96	75,41	75,36
	Trägheitsmoment	I_s	mm ⁴	6778,8	6956,1	6962,1
	Federsteifigkeit	K	N/mm ²	0,307	0,322	0,322
	Verzweigungs-Spannung	$\sigma_{cr,s}$	N/mm ²	351,88	344,09	343,53
	Abminderungs-Faktor	$\chi_{d,n}$	o.E.	0,744	0,735	0,735
	Reduzierte Wirksame Fläche	$A_{s,red}$	mm ²	88,40	92,65	92,85

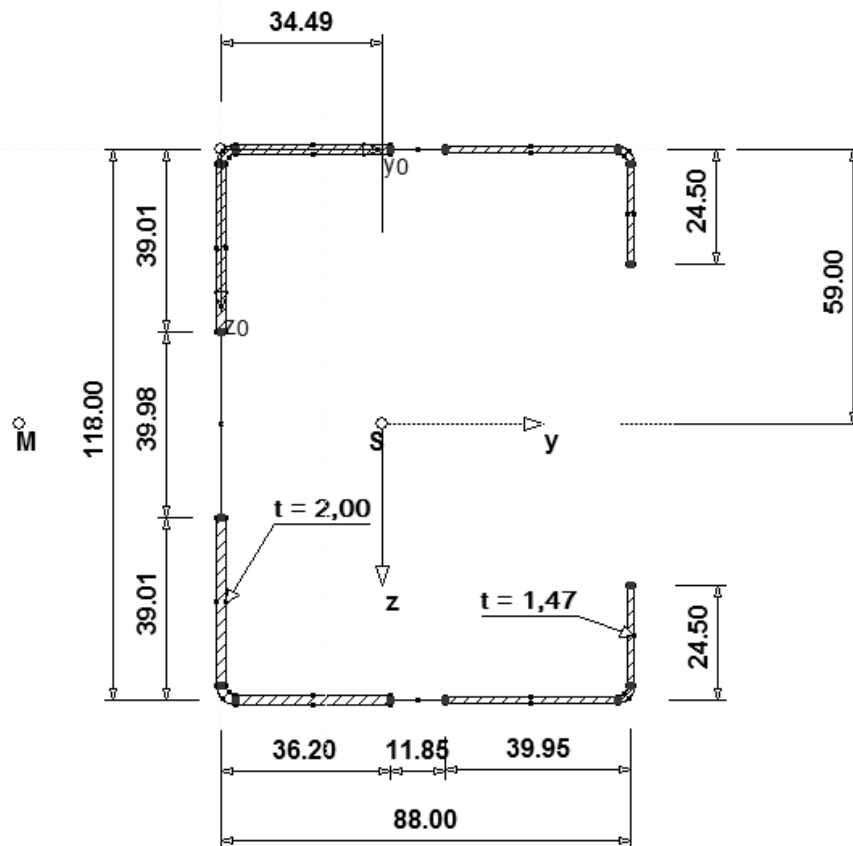
Querschnittswerte der reduzierten wirksamen Randsteife (Ergebnis der Iteration)

Gurt: $b_{e1,c} = 36,20\text{mm}$ $b_{e2,c} = 39,95\text{mm}$

Steg: $h_{e1,c} = h_{e2,c} = 39,01\text{mm}$

Lippe: $c_{\text{eff},c} = 24,50\text{mm}$

Randsteife: $t_{\text{red}} = t \cdot \frac{A_{s,\text{red}}}{A_s} = \chi \cdot t = 0,735 \cdot 2 = 1,47\text{mm}$



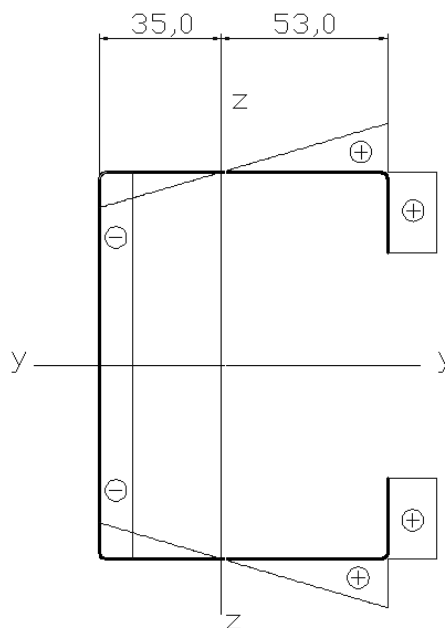
Tab.4.19: Effektive Querschnittswerte unter Biegebeanspruchung

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Fläche	A_{eff}	482	mm^2
Schwerpunktabstand in y-Richtung	$Y_{s,\text{eff}}$	34,49	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	$I_{\text{eff},y}$	130,61	cm^4
Trägheitsmoment um z- Achse	$I_{\text{eff},z}$	57,73	mm^4
Schwerpunktverschiebung in y- Richtung $e_{N,Y} = y_s - Y_{s,\text{eff}} = 35,01\text{mm} - 34,49\text{mm}$	$e_{N,Y}$	0,52	mm

4.2.5.4 Effektives Widerstandsmoment W_{eff} für Biegung um die z-z-Achse

Während der Bruttoquerschnitt einer reinen Druckbeanspruchung unterliegt, wird der wirksame Querschnitt nun durch Druck- und gleichzeitige Biegebeanspruchung um die z-z-Achse belastet. Dies resultiert aus der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirksamen Querschnitt in Richtung der y-y-Achse, die aufgrund der nunmehr exzentrischen Normalkraft am wirksamen Querschnitt eine zusätzliche Biegebeanspruchung M_z hervorruft. Somit muss folgend die Biegetragfähigkeit des dünnwandigen Querschnitts bestimmt werden.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse (Druck positiv):



Spannungsverhältnis:
$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{-(b_t - g_r)}{b_c - g_r}$$

$$\psi = \frac{-(35,0 - 0,88)}{53,0 - 0,88} = -0,655$$

Druckspannung:
$$\sigma_{\text{cam,ED}} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = \text{const.}$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_{yb}}} = \sqrt{\frac{235}{355}} = 0,814$$

- Wirksame Fläche des gedrückten Steges:

Steg ist zugbeansprucht → Steg ist voll wirksam

- Wirksame Fläche der Gurte mit gedrückter Randsteife:

Schritt 1: Wirksamer Querschnitt mit Federsteifigkeit der Steife $k=\infty$ unter Ansatz der maximalen Druckbeanspruchung zu

$$\sigma_{cam,ED} = f_{y,b} / \gamma_{M0} = f_{yb} = const.$$

Gurt (beidseitig gestützte Platte)

Beulwert:

$$k_{\sigma} = 7,81 - 6,29 \cdot (-0,655) + 9,78 \cdot (-0,655)^2$$

$$k_{\sigma} = 16,16 \quad (\text{EN 1993-1-5, Tab. 4.1})$$

Beulschlankheit:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}} = \frac{86,24 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{16,16}} = 0,464 \leq 0,848$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0$ (EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p / (1 - \psi) = 1,0 \cdot 86,24 / (1 - (-0,655)) = 52,11 \text{ mm}$$

$$b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff} = 0,4 \cdot 52,11 = 20,84 \text{ mm}$$

$$b_{e1,c} = b_{e1} + g_r = 20,84 + 0,88 = 21,72 \text{ mm}$$

$$b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff} = 0,6 \cdot 52,11 = 31,27 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.1)

Bezeichnung nach EN 1993-1-3:

$$b_{e1,web,c} = b_t + b_{e2} = 35,01 + 31,27 = 66,28 \text{ mm}$$

$$b_{e2,lip,c} = b_{e1,c} = 21,72 \text{ mm}$$

Randsteife (einseitig gestützte Platte)

Allgemeine Randbedingung:

$$\frac{b_{p,c}}{b_p} = \frac{23,62}{86,24} = 0,27 \leq 0,35$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.13b)

Beulwert:

Einseitig gelagerte Platte mit Teileinspannung

$$k_\sigma = 0,5 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.13b})$$

Beulslankheit:

$$\overline{\lambda}_p = \frac{b_{p,c} / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{23,62 / 2}{28,4 \cdot 0,814 \cdot \sqrt{0,5}} = 0,722 \leq 0,748$$

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Abminderungsfaktor: $\rho = 1,0 \rightarrow$ voll wirksam!

(EN 1993-1-5, Abs. 4.4(2))

Wirksame Breiten:

$$c_{eff} = \rho * b_{p,c} = 1,0 * 23,62 = 23,62 \text{ mm}$$

$$c_{eff,c} = c_{eff} + g_r = 23,62 + 0,88 = 24,50 \text{ mm}$$

(EN 1993-1-5, Tab. 4.2)

Schritt 2: Reduzierung der Tragspannung der wirksamen Steife aus Schritt 1 aufgrund der Forminstabilität (Knicken der Randversteifung)

Wirksame Querschnittswerte der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2)

Wirksame Fläche: $A_s = ((b_{e2,c} - r_m) + (c_{eff,c} - r_m) + u) \cdot t$

$$A_s = (21,72 - 3 + 24,50 - 3 + 4,71) \cdot 2 = 89,86 \text{ mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.14b)

Mittellinienabstand zwischen Gurt und Achse a-a:

$$e_s = \left(\frac{(c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot ((c_{eff,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$e_s = \left(\frac{(24,50 - 3) \cdot 2 \cdot ((24,50 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{89,86} \right)$$

$$e_s = 6,694 \text{ mm}$$

Mittellinienabstand zwischen Lippe und Achse b-b:

$$b_p + 2g_r - b_1 = \left(\frac{(b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot ((b_{e2,c} - r_m) / 2 + r_m) + u \cdot t \cdot (r_m - x_m)}{A_s} \right)$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = \frac{(21,72 - 3) \cdot 2 \cdot ((21,72 - 3) / 2 + 3) + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91)}{89,86}$$

$$b_p + 2g_r - b_1 = 5,26 \text{ mm}$$

$$\rightarrow b_1 = 88,00 - 5,26 = 82,74 \text{ mm}$$

Wirksames Trägheitsmoment (Achse a-a):

$$\begin{aligned}
 I_S &= 1/12 \cdot (b_{e2,c} - r_m) \cdot t^3 + (b_{e2,c} - r_m) \cdot t \cdot e_s^2 + 1/12 \cdot t \cdot (c_{eff,c} - r_m)^3 \\
 &\quad + (c_{eff,c} - r_m) \cdot t \cdot \left(r_m + \frac{c_{eff,c} - r_m}{2} - e_s \right)^2 + I_{y(RC)} + u \cdot t \cdot (r_m - x_m - e_s)^2 \\
 I_S &= 1/12 \cdot (21,72 - 3) \cdot 2^3 + (21,72 - 3) \cdot 2 \cdot 6,694^2 + 1/12 \cdot 2 \cdot (24,50 - 3)^3 \\
 &\quad + (24,50 - 3) \cdot 2 \cdot \left(3 + \frac{24,50 - 3}{2} - 6,69 \right)^2 + 4,5 + 4,71 \cdot 2 \cdot (3 - 1,91 - 6,694)^2 \\
 I_S &= 5787,7 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

Federsteifigkeit der wirksamen Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.1(5))

Allgemeine Parameter: $k_f = 1$ (Gurt 2 ebenfalls gedrückt)

$$b_2 = b_1 = 82,74 \text{ mm}$$

Federsteifigkeit:

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_w \cdot k_f} \\
 K &= \frac{210000 \cdot 2^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{82,74^2 \cdot 118,0 + 82,74^3 + 0,5 \cdot 82,74^2 \cdot 118,0 \cdot 1} \\
 K &= 0,260 \text{ N / mm}^2
 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-3; Gl. 5.10b)

Kritische Verzweigungslast der wirksamen, elastisch gebetteten Randsteife
(EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(7))

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,260 \cdot 210000 \cdot 5787,7}}{89,86} = 395,65 \text{ N/mm}^2$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.15)

Reduzierte wirksame Seitenfläche unter Berücksichtigung des Knickens der Randsteife (EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2(11))

Bezogener Schlankheitsgrad: $\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{f_{y,b}}{\sigma_{cr,s}}}$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{355}{395,65}} = 0,947 > 0,65$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12d)

Abminderungsfaktor: $\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,947 = 0,785$$

(EN 1993-1-3, Gl. 5.12b)

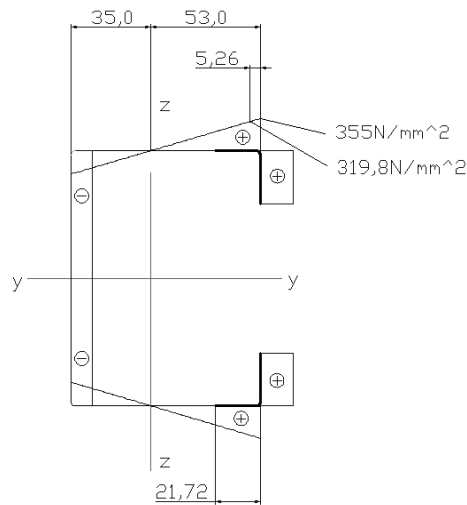
Reduzierte wirksame Fläche der Randsteife:

$$A_{s,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}} \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 5.17})$$

→ Dabei ist $\sigma_{com,ED}$ die am wirksamen Querschnitt ermittelte

Druckspannung in der Schwerlinie der Steife.

Spannungsverlauf bei Biegung um die z-z-Achse:



$$\sigma_{com,ED} = \frac{355 \cdot (53,0 - 5,26)}{53,0} = 319,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow A_{S,red} = \chi_d \cdot A_s \cdot \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ED}} = 0,785 \cdot 89,86 \cdot \frac{355 / 1}{319,8} = 78,30 \text{ mm}^2$$

Schritt 3: Optimierung – Iteration zur Ermittlung des Abminderungsfaktors der Steife nach [EN 1993-1-3, Abs. 5.5.3.2]

Da beide Gurte und Lippen voll wirksam sind, ist keine Optimierung/Iteration der Ergebnisse aus Schritt 1 und Schritt 2 notwendig!

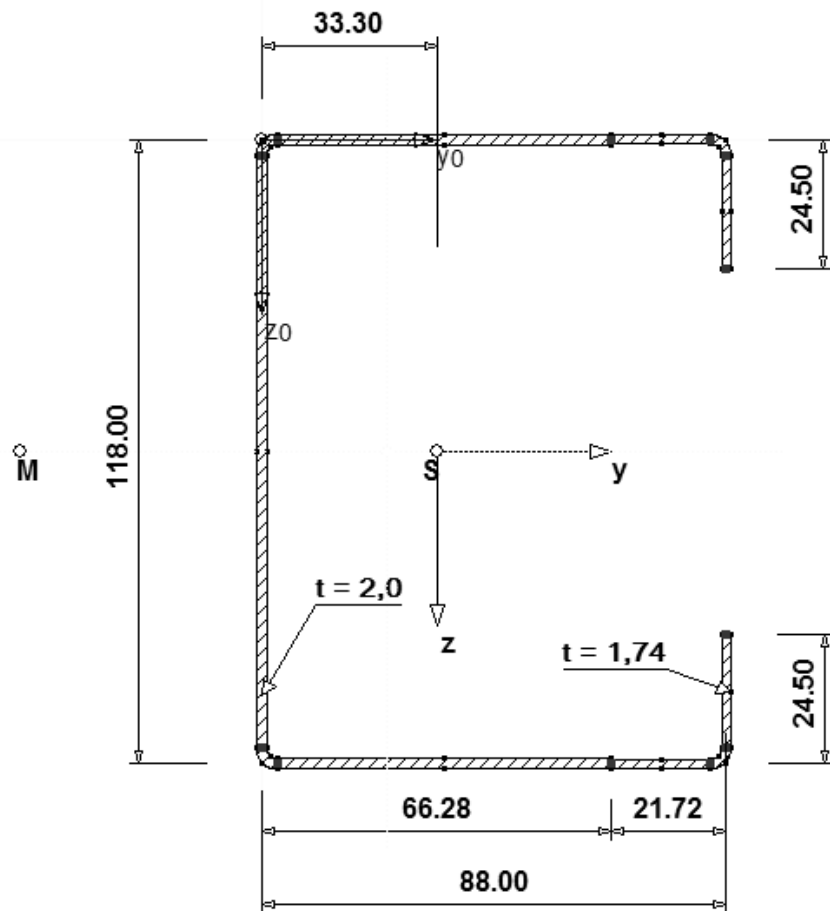
Querschnittswerte der reduzierten wirksamen Randsteife

Gurt: $b_{e1,web,c} = 66,28 \text{ mm} \quad b_{e2,lip,c} = 21,72 \text{ mm}$

Steg: $h_{e1,c} = h_{e2,c} = 59,00 \text{ mm}$

Lippe: $c_{eff,c} = 24,50 \text{ mm}$

Randsteife: $t_{red} = t \cdot \frac{A_{s,red}}{A_s} = 2 \cdot \frac{78,30}{89,86} = 1,74 \text{ mm}$

Wirksamer Querschnitt unter reiner Biegebeanspruchung um die z-z-Achse

Tab.4.20: Effektive Querschnittswerte unter Biegebeanspruchung

Querschnittswert-Bezeichnung	Symbol	Wert	Einheit
Fläche	A_{eff}	652	mm ²
Schwerpunktabstand in y-Richtung	$Y_{s,\text{eff}}$	33,30	mm
Trägheitsmoment um y- Achse	$I_{\text{eff},y}$	161,61	cm ⁴
Trägheitsmoment um z- Achse	$I_{\text{eff},z}$	74,25	cm ⁴
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 55,57mm)	$W_{\text{eff},z,\text{lip}}$	13,36	cm ³
Widerstandsmoment um z-Achse (im Abstand von 34,30mm)	$W_{\text{eff},z,\text{web}}$	21,64	cm ³

4.2.5.5 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Querschnittstragfähigkeit nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.1]

Aufgrund der Schwerpunktverschiebung vom Brutto- zum wirkamen Querschnitt ergibt sich eine Querschnittsbeanspruchung aus Druck und einaxialer Biegung um die z-z-Achse.

Der wirksame Querschnitt unter Druck- und Biegebeanspruchung um die z-z-Achse sollte folgende Bedingung erfüllen:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} \leq 1 \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. 6.25})$$

Beanspruchbarkeit für reinen Druck (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.3):

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{Mo}} = 482 \cdot 355 = 171110N = 171,11kN$$

(EN 1993-1-3, Gl. 6.2)

Zusatzmoment (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.9(2)):

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 0,52mm$$

Biegebeanspruchbarkeit um die z-z-Achse (EN 1993-1-3, Abs. 6.1.4):

$$M_{cz,Rd,com} = W_{z,eff,com} \cdot \frac{f_{y,b}}{\gamma_{M0}} = 13,36 \cdot \frac{35,5}{1,0} = 474,28kNcm$$

Wirksame Querschnittstragfähigkeit:

$$\frac{N_{Ed}}{171,11} + \frac{N_{Ed} \cdot 0,52 \cdot 10^{-1}}{474,28} \leq 1 \quad \rightarrow \quad N_{Ed} = 167,96kN$$

4.2.5.6 Grenzzustand der Tragfähigkeit – Beanspruchbarkeit unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität [EN 1993-1-3, Abs. 6.2]

a) Beanspruchbarkeit des Druckstabes [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2 + 6.2.3]

→ Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] ist die Beanspruchbarkeit eines Bauteils mit dem wirksamen Querschnitt für die Versagensformen Biegeknicken, Drillknicken und Biegedrillknicken zu ermitteln. Die kleinste Beanspruchbarkeit ist dabei die maßgebende Grenztragfähigkeit des Bauteils.

Biegeknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.2):

→ Da $I_z < I_y$ ist die Biegeknickbeanspruchbarkeit um die z-z-Achse maßgebend!

Bezugsschlankheitsgrad: $\lambda_1 = 93,9 \cdot \varepsilon = 93,9 \cdot 0,814 = 76,43$
(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.3)

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr} \cdot \sqrt{A_{eff} / A}}{i_z \cdot \lambda_1} = \frac{1500 \cdot \sqrt{482 / 676}}{34,4 \cdot 76,43} = 0,482 \quad (\text{EN 1993-1-1, Gl. (6.51)})$$

Imperfektionsbeiwert: Knicklinie „b“ nach [EN 1993-1-3, Tab. 6.3]

$$\rightarrow \alpha = 0,34 \quad (\text{EN 1993-1-1, Tab. 6.1})$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwert: } \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] \\ \phi &= 0,5 \left[1 + 0,34(0,482 - 0,2) + 0,482^2 \right] = 0,664 \\ &(\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2}) \end{aligned}$$

Abminderungsfaktor für Biegeknicken:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_z^2}}$$

$$\chi_z = \frac{1}{0,664 + \sqrt{0,664^2 - 0,482^2}} = 0,892$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegeknicken des wirksamen Querschnitts um die maßgebende Achse unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_z \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,892 \cdot 482 \cdot 355}{1,0} = 152630 N = 152,63 kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

Biegedrillknicken (EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3):

Bei Bauteilen mit einfach symmetrischem Querschnitt muss berücksichtigt werden, dass die Tragfähigkeit infolge Drillknickens oder Biegedrillknickens geringer sein kann, als beim Biegeknicken.

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die z-z-Achse:

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 79,87}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 735,73 kN$$

Kritische Verzweigungslast für Biegeknicken um die y-y-Achse:

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr}^2}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 10^{-1} \cdot 168,15}{1500^2 \cdot 10^{-2}} = 1548,94 kN$$

Kritische Verzweigungslast Drillknicken:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(G \cdot I_T + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_T^2} \right) \quad (\text{EN 1993-1-3, Gl. (6.33a)})$$

$$\rightarrow \text{dabei ist: } i_0^2 = i_z^2 + i_y^2 + y_0^2 + z_0^2 = 34,4^2 + 49,9^2 + 82,88^2 = 10542$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.33b))

$$N_{cr,T} = \frac{1}{10542 \cdot 10^{-2}} \cdot \left(8076,9 \cdot 0,090 + \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 3043,39}{1500^2 \cdot 10^{-2}} \right) = 272,83 kN$$

Kritische Verzweigungslast Biegedrillknicken:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2 \cdot \beta} \cdot \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right]$$

(EN 1993-1-3, Gl. (6.35))

$$\rightarrow \text{mit: } \beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 = 1 - \frac{82,88^2}{10542} = 0,348$$

$$N_{cr,TF} = \frac{1548,94}{2 \cdot 0,348} \cdot \left[1 + \frac{272,83}{1548,94} - \sqrt{\left(1 - \frac{272,83}{1548,94}\right)^2 + 4 \cdot \frac{82,88^2}{10542} \cdot \frac{272,83}{1548,94}} \right] = 243,58 \text{ kN}$$

$$N_{cr,TF} = 243,58 \text{ kN} \leq N_{cr,T} = 272,83 \text{ kN}$$

Bezogener Schlankheitsgrad für Biegedrillknicken:

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_{yb}}{N_{cr,TF}}} = \sqrt{\frac{482 \cdot 355}{243,58 \cdot 10^3}} = 0,838 \geq 0,2 \quad (\text{EN 1993-1-1, Gl. (6.53)})$$

Nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.3] und [EN 1993-1-3, Tab. 6.3] wird als Abminderungskurve zur Berücksichtigung des Biegedrillknickens von C- Profilen die europäische Knickspannungslinie „b“ verwendet.

$$\text{Imperfektionsbeiwert: } \alpha = 0,34$$

$$\begin{aligned} \text{Beiwert: } \phi &= 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_{TF} - 0,2) + \bar{\lambda}_{TF}^2 \right] \\ \phi &= 0,5 \left[1 + 0,34 \cdot (0,838 - 0,2) + 0,838^2 \right] = 0,960 \end{aligned}$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken:

$$\chi_{TF} = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_{TF}^2}}$$

$$\chi_{TF} = \frac{1}{0,960 + \sqrt{0,960^2 - 0,838^2}} = 0,700$$

(EN 1993-1-1, Abs. 6.3.1.2)

Beanspruchbarkeit für Biegedrillknicken des wirksamen Querschnitts unter Druckbeanspruchung:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_{TF} \cdot A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,700 \cdot 482 \cdot 355}{1,0} = 119777 N = 119,78 kN$$

(EN 1993-1-1, Gl. (6.48))

→ Die minimale Beanspruchbarkeit des Druckstabes ergibt sich durch das globale Stabilitätsproblem Biegedrillknicken.

$$\mathbf{N_{b,Rd} = 119,78kN}$$

b) Biegedrillknickbeanspruchbarkeit (Momententragfähigkeit) des Biegeträgers

Die Biegedrillknickbeanspruchbarkeit von Biegeträgern der QK 4 sollte mit der europ. Knickspannungslinie „b“ bestimmt werden [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.4].

Ideal- kritisches Verzweigungsmoment für Biegedrillknicken nach [DIN 4114]:

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_T^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{I_w}{I_y} + \frac{L_T^2 \cdot G \cdot I_T}{\pi^2 \cdot E \cdot I_y} + \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right)^2} - \left(\frac{r_z}{3} - z_0\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 168,15}{150^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{3043,39}{168,15} + \frac{150^2 \cdot 8076,9 \cdot 0,090}{\pi^2 \cdot 21000 \cdot 168,15} + \left(\frac{-2,88}{3} - 8,288\right)^2} - \left(\frac{-2,88}{3} - 8,288\right) \right)$$

$$M_{cr,z} = 30128 \text{ kNcm}$$

Bezogener Biegedrillknickschlankheitsgrad:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{w_{eff,z,tip} \cdot f_{yb}}{M_{cr,z}}} = \sqrt{\frac{13,36 \cdot 35,5}{30128}} = 0,125 < 0,2 \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$\rightarrow \chi_{TF} = 1,0$$

Biegedrillknickbeanspruchbarkeit:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot w_z \cdot f_{yb} / \gamma_{M1} \quad (\text{EN 1993-1-1, Abs. 6.3.2.2})$$

$$M_{b,Rd} = 1,0 \cdot 13,36 \cdot 35,5 / 1,0 = 474,28 \text{ kNcm}$$

→ Die maximale Biegebeanspruchbarkeit bei Biegung um die z-z-Achse beträgt:

$$\mathbf{M_{b,Rd} = 474,28 \text{ kNcm}}$$

c) Grenztragfähigkeit des Querschnitts unter Druck- und Biegebeanspruchung (Interaktionsnachweis) nach [EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5]

Bemessungswert der Normalkraftbeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(a)):

$$N_{b,Rd} = 119,78 \text{ kN}$$

Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit (siehe 4.2.2.6(b)):

$$M_{b,Rd} = 474,28 \text{ kNm}$$

Zusatzmoment aus Schwerpunktsverschiebung von A zu A_{eff}:

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_{Ny} = N_{Ed} \cdot 0,52 \text{ mm}$$

Interaktionsnachweis für Biegung und zentrische Druckkraft:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1,0 \quad (\text{EN 1993-1-3, Abs. 6.2.5})$$

$$\left(\frac{N_{Ed}}{119,78} \right)^{0,8} + \left(\frac{N_{Ed} \cdot 0,052}{474,28} \right)^{0,8} \leq 1,0$$

$$\rightarrow \quad N_{Ed} = 115,26 \text{ kN}$$

Das Grenzzustand der Tragfähigkeit für das Profil C120/90/2 unter reiner Druckbeanspruchung ist bei einer Normalkraft von 115,26 kN erreicht.

5. Auflistung und Auswertung der Ergebnisse

5.1 Querschnittswerte

Tab.5.1: Bruttoquerschnittswerte

	C80/90/2	C90/90/2	C100/90/2	C110/90/2	C120/90/2
A (mm²)	596	616	636	656	676
I_y (cm⁴)	67,34	87,82	11,39	138,13	168,15
I_z (cm⁴)	68,74	71,80	74,66	77,34	79,87

Tab.5.2: Effektive Querschnittswerte unter Druckbeanspruchung

	C80/90/2	C90/90/2	C100/90/2	C110/90/2	C120/90/2
A_{eff} (mm²)	475	477	480	481	482
I_{eff,y} (cm⁴)	53,12	69,00	87,40	107,33	130,61
I_{eff,z} (cm⁴)	57,71	57,85	58,02	57,82	57,73

Tab.5.3: Effektive Querschnittswerte unter Biegebeanspruchung

	C80/90/2	C90/90/2	C100/90/2	C110/90/2	C120/90/2
A_{eff} (mm²)	582	600	617	635	652
I_{eff,y} (cm⁴)	65,84	85,56	107,98	133,43	161,61
I_{eff,z} (cm⁴)	66,00	68,50	70,57	72,62	74,25

5.2 Grenztragfähigkeiten

Tab.5.4: Querschnittstragfähigkeit

	C80/90/2	C90/90/2	C100/90/2	C110/90/2	C120/90/2
$N_{c,Rd}$ (in kN)	168,63	169,34	170,40	170,76	171,11
$M_{cz,Rd,com}$ (in kNcm)	466,47	470,73	472,15	474,64	474,28
N_{Ed} (in kN) Interaktionsnachweis	152,43	156,04	160,39	163,86	167,96

Tab.5.5: Grenzzustand der Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der
Gesamtstabilität

	C80/90/2	C90/90/2	C100/90/2	C110/90/2	C120/90/2
$N_{b,Rd}$ (in kN) für Biegeknicken	147,50	149,52	151,15	151,80	152,63
$N_{b,Rd}$ (in kN) für Biegedrillknicken	83,64	93,81	103,94	112,70	119,78
$M_{b,Rd}$ (in kNcm)	466,47	470,73	472,15	474,64	474,28
N_{Ed} (in kN) Interaktionsnachweis	74,67	84,52	95,15	105,17	115,26

5.3 Auswertung

Bei der Berechnung nach Querschnittsklasse 4 kommt es zu ausfallenden Querschnitten, die eine Schwerpunktverschiebung gegenüber dem Bruttoquerschnitt zur Folge haben.

Da es sich bei C-Profilen um einfach symetrische Querschnitte handelt, entsteht ein einaxiales Biegemoment, welches den effektiven druckbeanspruchten Querschnitt zusätzlich auf Biegung belastet.

Dies hat zur Folge, dass bei den untersuchten C-Profilen nicht das Biegeknicken – wie für einen zentrisch belasteten Druckstab angenommen werden könnte – maßgebend ist, sondern die Biegedrillknickbeanspruchbarkeit des effektiven Querschnitts unter Druckbeanspruchung den weit größeren Einfluss auf die Tragfähigkeit des Querschnitts hat.

Die Grenztragfähigkeiten für Biegeknicken bewegen sich bei den 5 untersuchten C-Profilen in einem sehr engen Bereich, was durch die ähnlichen Widerstandsmomente um die schwache Achse des Brutto- sowie der Nettoquerschnitte zu erklären ist. Nimmt man die Grenztragfähigkeit gegen Biegeknicken von 147,5kN des Profils C80/90/2 als Referenzwert mit 100% an, so ergibt sich folgendes:

Tab.5.6 Grenztragfähigkeit gegen Biegeknicken

	C80/90/2	C90/90/2	C100/90/2	C110/90/2	C120/90/2
Grenztragfähigkeit Biegeknicken (in kN)	147,50	149,52	151,15	151,80	152,63
Veränderung der Tragfähigkeit (in %)	-	+1,37	+2,47	+2,92	+3,48
Veränderung des Materialeinsatzes (in %)	-	+3,36	+6,71	+10,07	+13,42

Aus Sicht des Nachweises gegen Biegeknicken zeigt sich eine Erhöhung der Stege als nicht sinnvoll. Die Tragfähigkeit kann bei einem um 13,42% erhöhten Materialaufwand nur um 3,48% gesteigert werden, was in keiner Relation steht.

Weit wichtiger ist der Einfluss der Stegerhöhung auf die Biegedrillknickbeanspruchbarkeit des effektiven Querschnitts unter Normalkraft. Da die aus der Schwerpunktverschiebung resultierende Biegung um die z-z-Achse ein mögliches Kippen des Druckgurtes hervorruft, erweist sich eine Erhöhung der Stege als sehr sinnvoll, da durch diese Maßnahme die Flansche weiter vom Schwerpunkt entfernt sind und sich somit ein wesentlich höheres Trägheitsmoment „ I_y “ realisieren lässt. Dieses hat erheblichen Einfluss auf die Erhöhung der kritischen Verzweigungslast für Biegeknicken um die y-y-Achse ($N_{cr,y}$).

Tab.5.7: Kritische Verzweigungslast $N_{cr,y}$

	C80/90/2	C90/90/2	C100/90/2	C110/90/2	C120/90/2
$N_{cr,y}$ (in kN)	620,31	808,97	1026,08	1272,40	1548,94

Eine Erhöhung von $N_{cr,y}$ wirkt sich positiv auf den Nachweis gegen Biegedrillknicken des effektiven Querschnitts unter Druckbeanspruchung aus. Nimmt man die Grenztragfähigkeit gegen Biegedrillknicken von 83,64kN des Profils C80/90/2 als Referenzwert mit 100% an, so ergibt sich daraus folgendes:

Tab.5.8: Grenztragfähigkeit des effektiven Querschnitts unter Druckbeanspruchung gegen Biegedrillknicken

	C80/90/2	C90/90/2	C100/90/2	C110/90/2	C120/90/2
Grenztragfähigkeit Biegedrillknicken(in kN)	83,64	93,81	103,94	112,70	119,78
Veränderung der Tragfähigkeit (in %)	-	+2,16	+24,27	+34,74	+43,21
Veränderung des Materialeinsatzes (in %)	-	+3,36	+6,71	+10,07	+13,42

Im Unterschied zu Tab.5.6 wird sehr deutlich, wie erheblich sich die Grenztragfähigkeit gegen Biegedrillknicken durch eine Erhöhung der Stege steigern lässt, wogegen die Grenztragfähigkeit gegen Biegeknicken von dieser Maßnahme nahezu unverändert blieb. Durch eine Erhöhung des Materialeinsatzes

um 13,42% erreicht man eine Steigerung der Grenztragfähigkeit gegen Biegedrillknicken um 43,21%.

Einen wiederum weit weniger großen Einfluss hat die Erhöhung der Stege auf die Momententragfähigkeit der untersuchten C- Profile. Da der Abminderungsfaktor χ_{TF} bei allen 5 untersuchten C- Profilen 1,0 ist, ist einzig das Widerstandsmoment des Bruttoquerschnitts für dessen Momententragfähigkeit maßgebend.

Da die C- Profile gleichzeitig einer zentrischen Druckkraft und einer Biegebeanspruchung unterliegen, musste ein Interaktionsnachweis nach folgender Formel geführt werden:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1,0$$

Wie in Tab.5.5 sehr gut zu sehen ist, nähern sich durch die Erhöhung der Stege der C-Profile, die Ergebnisse des Interaktionsnachweises schrittweise den Ergebnissen der Grenztragfähigkeit des Querschnitts unter Druckbeanspruchung gegen Biegedrillknicken an. Ist die Grenztragfähigkeit nach dem Interaktionsnachweis beim Profil C80/90/2 noch um 89,28% geringer als die Grenztragfähigkeit gegen Biegedrillknicken, so ist sie beim Profil C120/90/2 nur noch um 96,23% geringer. Dies resultiert aus der Stegerhöhung und der damit immer kleiner werdenden Schwerpunktverschiebung vom Brutto- hin zum Nettoquerschnitt, was wiederum ein geringer werdenden Moment um die z-z-Achse zur Folge hat. Somit ist das effektivste der 5 untersuchten C-Profile bei Beanspruchung auf zentrischen Druck das Profil C120/90/2. Es bietet die größte Tragfähigkeit im Verhältnis zum Materialeinsatz.

Tab.5.9: Verhältnis Tragfähigkeit zum Materialeinsatz

	C80/90/2	C90/90/2	C100/90/2	C110/90/2	C120/90/2
Tragfähigkeit (in %)	64,73	73,33	82,55	91,25	100
Materialeinsatz (in %)	88,17	91,12	94,08	97,04	100
Verhältnis	0,73	0,80	0,88	0,94	1

6. Zusammenfassung

Im modernen Ingenieurbau ist Kosteneffizienz das wichtigste Kriterium, um am Markt erfolgreich bestehen und wachsen zu können. Für den Planer bedeutet dies in erster Linie zwischen den beiden Einflussfaktoren *Rechenaufwand* und *Materialeinsatz* eine möglichst ausgewogene Lösung zu finden. Eine generelle Aussage, welchem dieser beiden Faktoren mehr Gewicht zukommt, kann nicht getroffen werden. Es ist zwar eine klare Tendenz hin zum materialoptimierten und somit ressourcenschonenden Konstruieren zu erkennen, da dem hohen Rechenaufwand mit moderner Software und Computertechnik gut entgegen gewirkt werden kann, aber man darf dabei nicht aus dem Auge verlieren, dass diese Technik in der Anschaffung teils erhebliche Kosten verursacht. Somit muss von Fall zu Fall untersucht werden, in welcher Relation ein erhöhter Rechenaufwand zur Materialersparnis steht, denn trotz der stark gestiegenen Rohstoffpreise in den vergangenen Jahren ist unwiderruflich, dass ebenfalls die Lohnkosten inklusive der Lohnnebenkosten ständig steigen und einen großen Anteil der Gesamtkosten eines Projektes verursachen.

Vorteile durch die Einführung des Eurocode:

Mit dem [EN 1993-1-3] kommt nun eine neue Norm zur Anwendung, die eine Vielzahl von Vorteilen mit sich bringt. Ein großer Vorteil liegt unter anderem darin, dass durch das Berechnungskonzept der wirksamen Breiten eine effizientere Querschnittsbemessung als nach dem Rechenmodell der zulässigen Spannungen nach [DIN 18800-3] möglich ist, was wiederum zur Folge hat, dass die Querschnittstragfähigkeiten teilweise enorm gesteigert werden können. Aus dem Standpunkt *Materialeffizienz* ist dem Eurocode als Nachfolgenorm der DIN also nichts entgegen zu setzen. Da viele Tragwerksplaner nicht nur mit Stahl, sondern auch mit Holz und Beton planen, muss neues Wissen schnell zugänglich und verständlich sein. In Sachen Verständlichkeit ist der Eurocode, vor allem auch für angehende Ingenieure, dank seiner vielen Anmerkungen und Verweise besser zu verstehen als die DIN. Auch die Nachweise sind übersichtlicher dargestellt.

Ein weiterer Vorteil ist in der Vollständigkeit zu sehen. Zwar ist der Eurocode dadurch gegenüber der DIN wesentlich umfangreicher aber er bietet beispielsweise im Gegensatz zur [DIN 18800] auch Formeln zur Ermittlung von Beulwerten für ausgesteifte Platten an, während man bei der Berechnung nach DIN auf zusätzliche Literatur angewiesen ist.

Nachteile durch die Einführung des Eurocode:

Natürlich bringt die Einführung des Eurocode nicht nur Vorteile mit sich.

In der Bachelorarbeit ist sehr gut zu sehen, welcher enormen Rechenaufwand der Eurocode schon bei der Bemessung eines C-Profils, das nur durch eine zentrische Normalkraft auf Druck beansprucht wird, mit sich bringt! Der Rechenaufwand steigt erheblich gegenüber der DIN. Dadurch ist zu befürchten, dass in Bereichen in denen sich durch die Bemessung nach Eurocode kaum Materialeinsparungen realisieren lassen, erhebliche Mehrkosten durch den erhöhten Planungsaufwand entstehen.

Ein weiterer großer Nachteil besteht darin, dass für jedes Land ein nationales Anwendungsdokument benötigt wird. Das ist zwar für die einzelnen Staaten von Vorteil, um ihre eigenen Interessen bzw. ländertypischen Gegebenheiten in die Norm einfließen zu lassen, hat aber zur Folge, dass das Ergebnis einer Berechnung nicht mehr unabhängig vom Ort der Berechnung ist. Während 1+1 überall auf der Welt immer 2 ergibt, liefert der Eurocode unterschiedliche Ergebnisse einer Bemessung in Abhängigkeit des Berechnungsortes. Damit wird das vom Leitpapier „L“ angestrebte Ziel „Entwurf und Bemessung in Übereinstimmung mit den EN- Eurocodes“ ad absurdum geführt, was unmöglich ursprüngliches Ziel dieser Norm gewesen sein kann.

Ebenfalls als nachteilig stellte sich im Rahmen dieser Bachelorarbeit heraus, dass sehr viele Formelzeichen aus griechischen Buchstaben mit Sonderzeichen bestehen (z.Bsp.: $\bar{\lambda}$), was sich im Computerzeitalter als nicht anwenderfreundlich erweist, da Formeleditoren für die Sonderzeichen benötigt werden, was wiederum einen großen Zeitaufwand bei der Eingabe mit sich bringt.

Forderungen für die Zukunft:

Viele Formelapparate des Eurocode sind zu umfangreich. Es sollte überlegt werden, ob zur Vereinfachung stellenweise Sparprogramme eingepflegt werden können, um Nachweise in Bezug auf die Tragfähigkeit wesentlich schneller führen zu können.

Um nur ein Beispiel zu nennen, könnte man überlegen die wirksamen Breiten pauschaler zu berechnen, d.h. die Hälfte links und die Hälfte rechts anzusetzen. Denn gerade bei kleineren Bauwerken, an denen ein dünnes Blech vorkommt, wäre es unverhältnismäßig, wenn dieses kleine Blech 40% der gesamten Statik ausmacht. Deshalb sollten zukünftig Vereinfachungen geschaffen werden.

Da Tragwerke heutzutage zunehmend mit der finiten Elementmethode gerechnet werden, müssen durch den Eurocode klare Regeln geschaffen werden, was alles zu berücksichtigen ist, denn FEM- Ergebnisse sind abhängig vom Programm, vom Nutzer und unterliegen diversen Fehlern. Der Eurocode macht hierfür im Anhang C bisher nur einen Anfang. Vereinfachungen und eine Verringerung des Rechenaufwandes bei den Nachweisen der Tragfähigkeit im Eurocode könnten diesem Trend entgegen wirken, denn es ist oftmals mit Skepsis zu beobachten, dass immer mehr Ingenieure ihre Querschnitte mittels FEM- Methode berechnen lassen und den Ergebnissen blind vertrauen, ohne zu wissen was eigentlich im Programmhintergrund passiert.

Fazit:

Die Einführung des Eurocode ist eine große Chance und Bereicherung. Altvertrautes abzulegen fällt oft schwer. Setzt man sich aber mit der neuen Norm ausgiebig auseinander, merkt man schnell, dass die Auslegung nach Eurocode ein in sich geschlossenes Gesamtkonzept ist, welches durch genauere Modellierung und Berechnungen realitätsnähere Ergebnisse liefert als die DIN.

Hohe Auslastung der Querschnitte ist in einer Welt immer knapper werdender Ressourcen unverzichtbar! Hierfür hat der Eurocode eine sehr gute Basis geschaffen, die allerdings in einigen Bereichen noch verbesserungsfähig ist.

Ein Europa ohne Grenzen benötigt eine einheitliche Normung wie den Eurocode.

Literaturverzeichnis

- Brune B.** Brune, B.: *Leichtbau nach EN 1993-1-3 – 2009 –*
58 Seiten, Dortmund, Technische Universität, Fakultät,
Bauwesen, 2009
- Detzel Annette** Detzel, Anette: *Zum Gesamtstabilitätsversagen*
Geschweißter Rechteckquerschnitte unter
Druckbelastung – 2006 – 138 Seiten, Stuttgart,
Universität, Fakultät Bau- und
Umweltingenieurwissenschaften, Dissertation, 2006
- DIN EN 1993-1-1** Norm DIN EN 1993-1-1, August 2010
Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den
Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1: 2005
+ AC: 2009
- DIN EN 1993-1-3** Norm DIN EN 1993-1-3, Februar 2007
Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte
dünnwandige Bauteile und Bleche; Deutsche Fassung
EN 1993-1-3: 2006
- DIN EN 1993-1-3NA** Norm DIN EN 1993-1-3NA, Februar 2008
Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte
dünnwandige Bauteile und Bleche;
Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter
- DIN EN 1993-1-5** Norm DIN EN 1993-1-5, Dezember 2010
Plattenförmige Bauteile; Deutsche Fassung
EN 1993-1-5: 2006 + AC: 2009

Laufs T.

Laufs, T.: *Workshop Eurocode 3 – 2009 –*
50 Seiten, Roßwein, Fachhochschule, Fakultät Stahl- und
Metallbau, Workshop, 2009

Werner 2010

Goris, Alfons: *Bautabellen für Ingenieure mit*
Berechnungsbeispielen und Hinweisen – 19.Auflage –
Köln: Werner Verlag, 2010

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich diese Bachelorarbeit selbstständig ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle den benutzten Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche einzeln kenntlich gemacht.

Diese Arbeit ist bislang keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden und auch nicht veröffentlicht worden.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.